



***SIMULAÇÃO DE COMPORTAMENTO DE
FOGO EM ZONAS FLORESTAIS NO
ALENTEJO CENTRAL
Comparação de Modelos de Combustível***

Luís Guilherme Molhinho Almeida Paixão

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do
grau de Mestre em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica

Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação
da Universidade Nova de Lisboa

**SIMULAÇÃO DE COMPORTAMENTO DE FOGO EM
ZONAS FLORESTAIS NO ALENTEJO CENTRAL**
Comparação de Modelos de Combustível

Dissertação orientada por:

Professor Doutor Pedro da Costa Brito Cabral

Mestre Nuno Gracinhas Guiomar

Novembro 2014

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Pedro Cabral pela disponibilidade constante e apoio prestado.

Ao colega Nuno Guiomar pelas ideias e sugestões que muito contribuíram para o estudo.

Um agradecimento especial à colega e elemento dos Bombeiros Voluntários de Portel, Patrícia Caeiro pelas informações prestadas, ao amigo Tiago Esperança, elemento dos Bombeiros Voluntários de Ferreira do Zêzere, pelas alegres “discussões” e ideias partilhadas e aos amigos Feitor e Mesquita pela ajuda.

Aos elementos do CDOS de Évora e a todos os que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus pais, à Joana e à Cristina.

A todos, Obrigado.

Simulação de comportamento de fogo em zonas florestais no Alentejo Central: comparação de modelos de combustível

RESUMO

Anualmente os incêndios florestais causam prejuízos por territórios por todo o mundo. Nas últimas décadas, estudos sobre o comportamento do fogo e avanços em tecnologias SIG, deram origem a modelos matemáticos de previsão e à sua inserção em sistemas informáticos de simulação de comportamento e propagação de fogo.

A utilização destes necessita da caracterização das variáveis que determinam o comportamento do fogo: variáveis topográficas, condições meteorológicas e combustível vegetal. A vegetação assume-se como a única variável que pode ser controlada através de medidas de gestão e a mais estudada por todo o mundo. A sua caracterização é geralmente efetuada através de modelos de combustível, que consiste num conjunto de propriedades quantificáveis utilizadas nos modelos de comportamento do fogo.

Através da utilização do simulador FARSITE, foi efetuada a simulação de comportamento de fogo em áreas de ocorrência de incêndios florestais localizadas na região do Alentejo Central, Portugal, recorrendo a diversos conjuntos de modelos de combustível para caracterizar a vegetação.

Os resultados evidenciam, no geral, um maior rigor dos modelos de combustível customizados na caracterização da vegetação da área de estudo.

Fire behavior simulations in Central Alentejo forest areas: fuel models comparison

ABSTRACT

Annually, forest wildfires cause damages in territories worldwide. In the last decades, studies on fire behavior and advances in GIS technologies allowed the development of mathematical forecast models and their integration into fire behavior and spread simulation computer systems.

The use of these requires the characterization of variables that determine fire behavior: topographic variables, weather conditions and vegetation fuel. The vegetation arises as the only controllable variable through management measures and the most studied worldwide. Vegetation characterization is usually accomplished through fuel models, consisting of a set of measurable properties used in the fire behavior models.

By using FARSITE simulator, it was preformed the fire behavior simulation in forest wildfire occurrence areas located in the Central Alentejo region, Portugal, using different sets of fuel models to characterize the vegetation.

The results indicate, in general, a better accuracy of custom fuel models in characterizing the study area vegetation.

PALAVRAS-CHAVE

Incêndios florestais

Modelos de combustível

Vegetação

Sistemas de Informação Geográfica

Comportamento de fogo

KEYWORDS

Forest wildfires

Fuel models

Vegetation

Geographical Information Systems

Fire behavior

ACRÓNIMOS

AFN – Autoridade Florestal Nacional

CAOP – Carta Administrativa Oficial de Portugal

CDOS – Comando Distrital de Operações de Socorro

COS – Carta de Ocupação do Solo

EMC – *Equilibrium Moisture Content*

ESRI – *Environmental Systems Research Institute*

ICNF – Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas

IFN – Inventário Florestal Nacional

IGP – Instituto Geográfico Português

MDE – Modelo Digital de Elevações

PNDFCI – Plano Nacional de Defesa da Floresta Contra Incêndio

TIN – *Triangular Irregular Network*

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

ÍNDICE DO TEXTO

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
PALAVRAS-CHAVE	vi
KEYWORDS	vi
ACRÓNIMOS	vii
ÍNDICE DE TABELAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE EQUAÇÕES	xi
1 Introdução	1
1.1 <i>Objetivos</i>	3
1.2 <i>Comportamento do fogo</i>	4
1.2.1 Condicionantes Ambientais	5
1.2.2 Modelos de Comportamento de Fogo	9
1.2.3 Sistemas de Simulação de Comportamento de Fogo	10
1.3 <i>Simulador FARSITE</i>	12
1.3.1 Parâmetros de Entrada	13
1.3.2 Técnica de Propagação e Modelos de Comportamento de Fogo	18
2 Metodologia	21
2.1 <i>Área de Estudo</i>	21
2.2 <i>Materiais e Dados</i>	23
2.2.1 Casos de estudo	23
2.2.2 Dados geográficos e climáticos	29
2.2.3 Parâmetros de simulação	30
2.3 <i>Análise Estatística</i>	44
3 Resultados	49
4 Conclusões	63
Referências Bibliográficas	65
Anexos	72
<i>Anexo I - Matrizes de erro das simulações</i>	72

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – <i>Timelag</i> e classes de diâmetro dos combustíveis mortos.....	9
Tabela 2 – Lista de dados geográficos utilizados.	29
Tabela 3 – Lista de dados meteorológicos utilizados.	29
Tabela 4 – Parâmetros dos modelos de combustível desenvolvidos por Fernandes, et al., 2009 . SVR – relação Superfície-Volume (Surface to Volume Ratio); Hx – teor de humidade de extinção (Moisture of Extinction); HC – poder calorífico (Heat Content).	36
Tabela 5 – Parâmetros dos modelos de combustível do sistema UCO40 (Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011). SVR – relação Superfície-Volume (Surface to Volume Ratio); Hx – teor de humidade de extinção (Moisture of Extinction); HC – poder calorífico (Heat Content).	37
Tabela 6 – Modelos de combustível predominantes nos casos de estudo.	42
Tabela 7 – Valores de teor de humidade (Fuel Moisture) de todos os modelos de combustíveis.	42
Tabela 8 – Simulações efetuadas para o caso de estudo de 2001.	43
Tabela 9 – Resumo da avaliação estatística das simulações relativas ao caso de estudo 2001. ...	51
Tabela 10 - Resumo da avaliação estatística das simulações relativas ao caso de estudo 2003. ..	55
Tabela 11 - Resumo da avaliação estatística das simulações relativas ao caso de estudo 2004. ..	58
Tabela 12 - Resumo da avaliação estatística das simulações relativas ao caso de estudo 2005. ..	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Triângulo do fogo e suas componentes (Countryman, 1972).	5
Figura 2 – Dados de entrada, relativos à topografia e vegetação, do simulador FARSITE (Finney, 2004).	13
Figura 3 – Dados de entrada e <i>output</i> do simulador FARSITE.	17
Figura 4 – Ilustração do princípio de Huygens através de ondas elípticas, em condições uniformes e não uniformes (Finney, 2004).	18
Figura 5 - Localização da área de estudo, Serra de Portel.	21
Figura 6 – Localização dos perímetros de incêndio dos casos de estudo.	23
Figura 7 – Perímetro de incêndio do caso de estudo 2001.	24
Figura 8 – Perímetro de incêndio do caso de estudo 2003.	25
Figura 9 – Perímetro de incêndio do caso de estudo 2004.	26
Figura 10 – Perímetro de incêndio do caso de estudo 2005.	27
Figura 11 – Esquema do processo de elaboração dos dados de entrada FARSITE, relativos à topografia.	30
Figura 12 – Aspeto geral da elevação, declive e orientação de encosta, gerados pela função TIN da área de estudo.	31
Figura 13 – Exemplo de ficheiro de clima, caso de estudo 2001 – Monte Novo.	31
Figura 14 – Esquema do processo de elaboração dos mapas de combustível e coberto arbóreo.	35
Figura 15 – Mapa de combustível para o cenário de modelos de combustível de Anderson, 1982.	38
Figura 16 - Mapa de combustível para o cenário de modelos de combustível de Scott & Burgan, 2005.	39
Figura 17 - Mapa de combustível para o cenário de modelos de combustível de Fernandes, et al., 2009.	40
Figura 18 - Mapa de combustível para o cenário de modelos de combustível do sistema UCO40 (Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011).	41
Figura 19 – Exemplo de mapa e matriz de erro, de áreas ardidas e não ardidas, reais e simuladas.	45
Figura 20 – Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2001, com condições topográficas geradas pelo algoritmo TIN.	49
Figura 21 - Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2001, com condições topográficas geradas pelo algoritmo <i>Topo to Raster</i>	50
Figura 22 – Taxa de propagação (m min^{-1}) da simulação de 2001 com modelos de combustível de Fernandes, et al. (2009) e cenário topográfico <i>Topo to Raster</i>	52

Figura 23 - Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2003, com condições topográficas geradas pelo algoritmo TIN.	53
Figura 24 - Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2003, com condições topográficas geradas pelo algoritmo <i>Topo to Raster</i>	54
Figura 25 - Taxa de propagação (m min^{-1}) da simulação de 2003 com modelos de combustível de Fernandes, et al. (2009) e cenário topográfico TIN.	56
Figura 26 - Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2004, com condições topográficas geradas pelo algoritmo TIN.	57
Figura 27 - Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2004, com condições topográficas geradas pelo algoritmo <i>Topo to Raster</i>	58
Figura 28 - Taxa de propagação (m min^{-1}) da simulação com modelos de combustível de Fernandes, et al. (2009) e cenário topográfico TIN.	59
Figura 29 - Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2005, com condições topográficas geradas pelo algoritmo TIN.	60
Figura 30 - Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2005, com condições topográficas geradas pelo algoritmo <i>Topo to Raster</i>	61

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Modelo semi-empírico de Rothermel, taxa de propagação R (m min^{-1}).	19
Equação 2 – Modelo semi-empírico de Rothermel, intensidade frente de fogo I_b (kW m^{-1}).	20
Equação 3 – Coeficiente Kappa (K) de Cohen.	46
Equação 4 – Significância (Z) do coeficiente K de Cohen.	46
Equação 5 – Variância do coeficiente K de Cohen, Var (K).	47
Equação 6 - Significância (Z) da diferença entre coeficientes K de Cohen.	47

1 INTRODUÇÃO

As áreas florestais (áreas arborizadas e matos) ocupam uma significativa parte do território de Portugal continental. De acordo com o Inventário Florestal Nacional, na sexta revisão (ICNF, 2013), em 2010, o território nacional apresentava cerca de 35% de florestas e 16% de matos, num total de 51%, correspondentes a 4,6 milhões de hectares. Relativamente às áreas arborizadas, evidencia-se o domínio de 4 espécies: eucalipto com 812 mil ha (26%), sobreiro com 737 mil ha (23%), pinheiro-bravo com 714 mil ha (23%) e azinheira com 331 mil ha (11%) (ICNF, 2013).

Por outro lado, o território continental português encontra-se maioritariamente englobado na Região Biogeográfica Mediterrânica (Costa, et al., 1998) caracterizada por um clima temperado de Verões com escassa precipitação, aumentando assim a suscetibilidade territorial para a ocorrência de incêndios florestais, que se concentram nestes períodos críticos de stress hídrico.

Na década de 2000-2010 registaram-se no território nacional cerca de 275 mil ocorrências de incêndios florestais, das quais 60 mil deram origem a incêndios florestais num total de 1,7 milhões de hectares de área ardida. Só nos anos de 2003 e 2005 arderam, respetivamente, cerca de 420 mil (24,7%) e 340 mil (20%) ha de floresta e mato (AFN, 2011b).

Estes anos, atipicamente severos, geraram reações na Administração Pública e na comunidade em geral. Assim foi aprovado em 2006 o Plano Nacional de Defesa da Floresta Contra Incêndio (PNDFCI) com o objetivo de organizar a administração pública, produtores florestais privados e toda a sociedade em geral num esforço conjunto para minimizar as enormes perdas sociais e ambientais geradas pelos incêndios (AFN, 2011a).

Diversos estudos acerca das características e comportamento do fogo foram também desenvolvidos nas últimas décadas no sentido de melhorar o conhecimento científico sobre a ocorrência e propagação de incêndios florestais e integrá-lo em modelos de avaliação da perigosidade de incêndios florestais. O desenvolvimento de modelos capazes de prever o comportamento do fogo e a sua integração em sistemas informáticos de simulação, veio oferecer novas ferramentas, a investigadores e gestores do território, no apoio à decisão, no planeamento à prevenção e combate aos incêndios florestais.

Grande parte dos modelos de comportamento de fogo e sistemas de simulação foram desenvolvidos com o objetivo de prever o comportamento do fogo em territórios na América do Norte, nomeadamente nos parques naturais dos EUA (Finney, 1994), incluindo descrições estandardizadas das especificidades da vegetação (modelos de combustível). O recurso a modelos de comportamento de fogo e simuladores nas regiões mediterrânicas da Europa, geralmente pressupõe a atribuição desses modelos de combustível estandardizados aos complexos vegetais mediterrânicos (Fernandes, 2009).

No entanto, as diferenças dos complexos vegetais americanos e mediterrânicos são evidentes (Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011), pelo que é essencial a formulação de modelos de combustível mais adequados à realidade mediterrânica.

Diversos estudos (Dimitrakopoulos, 2002; De Luís, et al., 2004; Cruz, 2005; Cruz & Fernandes, 2008; Fernandes, 2009; Fernandes, et al., 2009; Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011) tiveram como objetivo a caracterização de complexos vegetais mediterrânicos, considerando a sua influência no comportamento do fogo.

O presente trabalho foca-se na utilização de vários conjuntos de modelos de combustível standardizados (Anderson, 1982; Scott & Burgan, 2005) e customizados para regiões mediterrânicas (Fernandes, et al., 2009; Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011) em simulações de comportamento e propagação de incêndios florestais em zonas mediterrânicas.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho visa a comparação de diferentes modelos de combustível através dos resultados de simulação de comportamento de fogo em zonas florestais mediterrânicas do Alentejo Central, com recurso ao simulador informático FARSITE. Pretende-se com estas simulações, retirar conclusões acerca da utilidade do simulador de comportamento do fogo e dos modelos de combustível utilizados, para áreas florestais dominadas, essencialmente, por espécies como *Quercus suber* L. (sobreiro), *Quercus rotundifolia* Lam. (azinheira), *Lavandula luisieri* (Rozeira) Rivas-Martínez (rosmaninho), *Arbutus unedo* L. (medronheiro) *Genista hirsuta* Vahl. (tojo), *Cistus salvifolius* L. (sargaços) e *Cistus ladanifer* L. (esteva) típicas da região do Alentejo.

Com este processo analítico pretende-se avaliar os diferentes modelos de combustível disponíveis, aumentar o conhecimento sobre o comportamento do fogo nestes complexos de combustível e ainda, fornecer informações práticas para uso no planeamento de defesa da floresta contra incêndios, mais precisamente na prevenção de incêndios florestais através da gestão de combustíveis.

1.2 Comportamento do fogo

O fogo é um fenómeno natural que ocorre na maior parte dos ecossistemas terrestres (Bond & Keeley, 2005). Por outro lado é uma ferramenta amplamente usada na gestão do espaço (Neary, et al., 2005). Quando ocorre sem controlo em zonas consideradas florestais (áreas arborizadas e matos) recebe a designação de incêndio florestal.

A ocorrência de incêndios depende da inter-relação entre 3 componentes essenciais: fonte de calor, oxigénio e combustível. Após a ignição inicial, e desde que na presença dos 3 componentes acima referidos, o incêndio tem condições para, ao longo do tempo, progredir por um território.

O seu comportamento é fortemente influenciado pela interação das condições meteorológicas, topografia e vegetação (Countryman, 1972) e pode ser definido pela forma como reage a estes componentes (DeBano, et al., 1998).

O aumento de interesse por parte de investigadores e gestores do território nos ecossistemas e no fogo (Finney, 1994) levou, nas últimas décadas, a diversas investigações no desenvolvimento de modelos matemáticos de comportamento do fogo e na sua integração em sistemas informáticos de simulação (Pastor, et al., 2003).

1.2.1 Condicionantes Ambientais

O comportamento do fogo está intimamente ligado ao ambiente onde ocorre e resulta da interação de 3 componentes, topografia, vegetação e condições meteorológicas (Figura 1), constituindo o designado triângulo do fogo (Countryman, 1972).

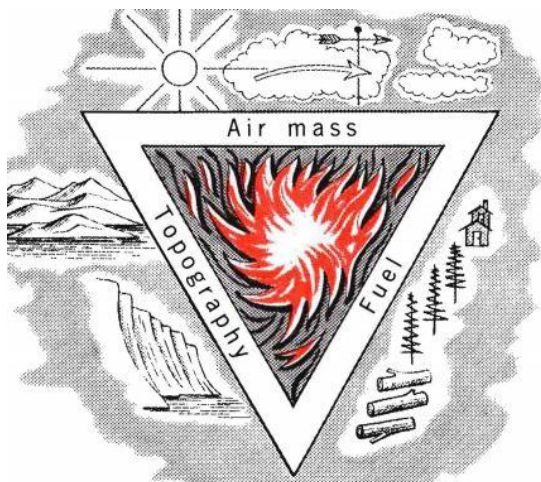


Figura 1 – Triângulo do fogo e suas componentes (Countryman, 1972).

A componente da topografia incorpora vários elementos, como a altitude, orientação de encosta e declive, e pode variar fortemente no espaço embora tenha um carácter estático ao longo do tempo. Para além de influenciar diretamente o comportamento de fogo, a topografia pode também condicionar a vegetação e as condições meteorológicas (Pyne, et al., 1996).

A altitude pode ser um fator limitante no que diz respeito a temperatura do ar, precipitação, níveis de oxigénio (fator necessário à ignição), condicionando em simultâneo a composição estrutura da vegetação.

Por sua vez a orientação de encosta é determinante na quantidade de energia solar incidente podendo igualmente influenciar os ventos dominantes. No Hemisfério Norte, encostas viradas a norte estão menos

expostas à energia solar, logo serão mais frescas que as encostas viradas a sul (Pyne, et al., 1996). No entanto o aumento de disponibilidade hídrica nas encostas a norte pode levar a um aumento de carga de combustível.

O declive é um fator que influencia diretamente o comportamento do fogo. Terrenos mais declivosos proporcionam mais calor transmitido e maior contacto da chama de fogo com o combustível envolvente, do que terrenos mais planos, para incêndios com propagação em sentido ascendente (Rothermel, 1972; Butler, et al., 2007). Em conjunto com a orientação de encosta, é também uma influência na radiação solar incidente. O declive é ainda um fator importante no fenómeno atmosférico de deslocação do ar no sentido ascendente que ocorre durante o dia com o aumento de temperatura.

A meteorologia consiste no fator mais variável do triângulo do fogo, podendo variar tanto no tempo como no espaço. A sua expressão é tal que pode sobrepor-se às outras componentes e sozinha condicionar o comportamento do fogo (Pyne, et al., 1996).

As condições meteorológicas podem ser classificadas de acordo com a sua influência na ignição ou na propagação do fogo (Velez, 2000).

Os fatores que influenciam a ignição estão diretamente ligados às condições de teor de humidade dos combustíveis: radiação solar, precipitação, temperatura do ar e humidade relativa. A interação destes fatores influencia diretamente a quantidade de água presente no solo e na vegetação. A ignição será tão mais facilitada quanto menor for o teor de água no ambiente de fogo.

Por sua vez, os movimentos de massas de ar, como o vento (intensidade e direção) e estabilidade atmosférica, são fatores que atuam na propagação de fogo e estão fortemente associados ao seu comportamento. O vento é o elemento meteorológico mais importante e variável que afeta o

comportamento do fogo (Countryman, 1972), podendo apresentar variações de intensidade e direção difíceis de prever. Em conjunto com o declive pode igualmente acelerar a evapotranspiração das plantas e facilitar a transmissão de calor e o contacto da chama de fogo com os combustíveis envolventes (Rothermel, 1972).

A última componente diz respeito ao combustível, ou seja, a vegetação. O complexo vegetal de um território constitui o meio de propagação do fogo e a sua caracterização permite a definição do seu efeito no comportamento (Pyne, et al., 1996). Embora seja difícil de classificar devido à sua heterogeneidade, o combustível vegetal é a variável mais estudada nos estudos de avaliação do comportamento do fogo e a única que pode ser controlada com medidas de gestão e planeamento (Chuviesco & Martin, 1994; Finney, 2001).

Os combustíveis vegetais podem ser caracterizados através de um conjunto de características físicas e químicas que influenciam o comportamento do fogo. De entre outras destacam-se o poder calorífico definido pela energia libertada por quantidade de combustível, a carga de combustível expressa pelo peso dos combustíveis por unidade de área, a relação superfície-volume, que define as dimensões das partículas do combustível, e o teor de humidade do combustível.

O teor de humidade é um fator que pode apresentar grandes variações no tempo e espaço e assume-se de extrema importância no comportamento do fogo, embora a sua influência diminua à medida que a fonte de calor aumenta, ou seja, à medida que a frente de fogo evolui (White & Zipperer, 2010). Para que a ignição se efetive é necessário a incidência de calor sobre o combustível e assim provocar a evaporação da água nele presente. O teor de humidade dos combustíveis é expresso em percentagem e calculado pela seguinte expressão, $\frac{Peso_{inicial} - Peso_{seco}}{Peso_{seco}}$. Outro fator utilizado na

caracterização dos combustíveis é o teor de humidade de extinção, definido pelo valor de teor de humidade a partir da qual o fogo não se propaga (Bradshaw, et al., 1983).

A vegetação é geralmente distinguida em extratos relativos a um plano representativo do nível do solo (Pyne, et al., 1996). Assim, podem considerar-se 3 extratos distintos de combustível: combustíveis subterrâneos, combustíveis de superfície e combustíveis do copado.

Os combustíveis subterrâneos englobam a camada de matéria orgânica em decomposição no solo, húmus e raízes. A maioria dos incêndios florestais propaga-se pelo extrato arbustivo (combustíveis de superfície), sendo este visto como o mais importante no comportamento do fogo. Nele são considerados árvores e arbustos até 2-3 metros de altura, vegetação herbácea e resíduos lenhosos. Por fim consideram-se as árvores e arbustos acima de 2-3 metros de altura, os constituintes dos combustíveis do copado (Pyne, et al., 1996).

Os combustíveis também se diferenciam como mortos ou vivos. Nos combustíveis mortos o teor de humidade depende exclusivamente das condições meteorológicas (Bradshaw, et al., 1983) e é frequentemente definido através do EMC, *Equilibrium Moisture Content*. O EMC define o teor de humidade do combustível considerando condições atmosféricas de humidade e temperatura constantes (Bradshaw, et al., 1983).

O combustível morto é classificado pelo tempo necessário (*timelag*, horas) para a perda de aproximadamente $\frac{2}{3}$ da diferença entre o teor de humidade inicial e o EMC, em condições constantes de humidade e temperatura. São assim definidas 4 classes (Tabela 1): até 2hr, de 2hr a 20hr, de 20hr a 200hr e mais de 200hr, sendo atribuída a classificação correspondente ao ponto médio dos intervalos de tempo, ou seja, 1hr, 10hr, 100hr e 1000hr, respetivamente. As classes de dimensão definidas pelo

diâmetro dos combustíveis podem também ser relacionadas com as classes de *timelag*: até 0,6cm, 0,6 - 2,5cm, 2,5 - 7,6cm e mais de 7,6cm (Bradshaw, et al., 1983).

Timelag	Classe de diâmetro
1hr	> 0,6 cm
10hr	0,6-2,5 cm
100hr	2,5-7,6 cm
1000hr	< 7,6 cm

Tabela 1 – *Timelag* e classes de diâmetro dos combustíveis mortos.

No que respeita aos combustíveis vivos o teor de humidade é regulado por processos fisiológicos, e pode ser diferenciado em combustível vivo herbáceo ou lenhoso (Bradshaw, et al., 1983).

1.2.2 Modelos de Comportamento de Fogo

O conhecimento das características do território e da forma como o fogo pode percorrê-lo traduzido num modelo, constitui uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, não só na prevenção e combate ao incêndio mas também na gestão e ordenamento florestal em geral.

Nas últimas décadas foram desenvolvidos diversos modelos matemáticos com o objetivo de simular o comportamento de fogo. Estes são assentes em equações que caracterizam a evolução espacial e temporal do comportamento do fogo como, por exemplo, a taxa de propagação ou a intensidade de frente de fogo. Podem ser classificados de acordo com, a natureza dos processos analíticos que lhes estão subjacentes (teóricos, empíricos, semi-empíricos), dos *outputs* gerados a partir dos mesmos (propagação do fogo, propriedades frente de fogo) ou, ainda do objetivo de modelação (regimes de fogo de superfície, copa, salto de fogo) (Pastor, et al., 2003).

Os modelos de propagação de fogo de superfície constituem os modelos de comportamento de fogo mais estudados por investigadores de todo o mundo.

Um dos mais famosos e amplamente utilizado é o modelo semi-empírico de Rothermel (1972) baseado no balanço global de energia (Pastor, et al., 2003). Para a aplicação do modelo é necessária a descrição de um conjunto de parâmetros relativos à vegetação (combustível) no sentido de se determinar a taxa de propagação e a intensidade da frente de fogo (Rothermel, 1972). Este conjunto de dados permite a agregação dos complexos de combustível em modelos de combustível, sendo os mais utilizados os modelos desenvolvidos por Anderson (1982).

Quanto à propagação do fogo pelo copado, a sua modelação é complexa pelo que poucos trabalhos foram desenvolvidos neste âmbito (Van Wagner, 1977; Call & Albini, 1997; Gómez-Vásquez, et al., 2013). Os modelos desenvolvidos podem ser classificados de 2 formas, modelos de iniciação de fogo de copa ou modelos de propagação de fogo de copa (Pastor, et al., 2003). Dos vários modelos existentes é de realçar o modelo semi-empírico de propagação de fogo desenvolvido por Van Wagner (1993) como um dos mais aceites.

Modelos de salto de fogo e fogo subterrâneo também foram desenvolvidos, no entanto não foram considerados no âmbito deste trabalho.

1.2.3 Sistemas de Simulação de Comportamento de Fogo

Os modelos matemáticos de comportamento de fogo podem ser integrados em aplicações informáticas constituindo sistemas de cálculo ou simulação de comportamento de fogo (Albright & Meisner, 1999).

Alguns sistemas de simulação de comportamento de fogo são baseados no modelo semi-empírico de Rothermel (1972), incorporado no software BEHAVE – Fire Behaviour Prediction and Fuel Modeling System (Andrews, 1986), desenvolvido nos anos '80 pelo Serviço Florestal do Departamento de Agricultura dos EUA. Desde então vários sistemas foram desenvolvidos em diversos países. Com o avanço em tecnologias e software SIG, os sistemas de simulação tornaram-se capazes de suportar grandes quantidades de informação geográfica e com isso oferecer suporte visual do comportamento do fogo na paisagem (Pastor, et al., 2003).

Para além dos modelos matemáticos de comportamento do fogo, tema abordado no capítulo anterior, os sistemas de simulação englobam ainda uma técnica de simulação que define a forma de propagação do fogo pela paisagem. A sua implementação pode ser efetuada através de processos matemáticos baseados em vetores pela aplicação do princípio de Huygens (Anderson, et al., 1982), considerando a paisagem como um espaço contínuo, ou através da aproximação *raster*, pela qual o território é considerado como constituído por células de iguais dimensões com características definidas (Lopes, et al., 2002). Na aproximação *raster* a propagação do fogo de uma célula para as células vizinhas é regulada por uma série de regras específicas ou probabilidades de ocorrência (Karafyllidis & Thanailakis, 1997; Berjak & Hearne, 2002; Lopes, et al., 2002; Alexandridis, et al., 2008).

Neste sentido, os sistemas de simulação podem incluir uma das seguintes técnicas: propagação de onda elíptica (*elliptical wave propagation*), considerando o território como espaço contínuo (Anderson, et al., 1982); autómatos celulares (*cellular automaton*) ou percolação de ligação (*bond percolation*), considerando o território como um conjunto de células (Albright & Meisner, 1999).

O FARSITE (Finney, 2004), um dos sistemas de simulação mais utilizado em todo o mundo, é descrito em mais pormenor no sub-capítulo seguinte.

1.3 Simulador FARSITE

FARSITE (Finney, 1994) é um simulador determinístico de comportamento e propagação do fogo baseado no modelo semi-empírico desenvolvido por Rothermel (1972). Incorpora vários modelos de comportamento de fogo (fogo de superfície, fogo de copado, salto de fogo) e faz uso da técnica de propagação de onda elíptica, aplicando o princípio de Huygens (Anderson, et al., 1982), para simular a evolução espacial do perímetro de fogo.

Para a sua utilização são necessários dados relativos à topografia, vegetação e condições meteorológicas no sentido de simular o comportamento e propagação de fogo. Inclui um conjunto de modelos standardizados (Anderson, 1982; Scott & Burgan, 2005) para caracterizar os combustíveis, mas permite a customização de novos modelos.

Inicialmente desenvolvido para simular o comportamento de incêndios nos parques naturais dos EUA (Finney, 1994), FARSITE pode ser utilizado em regiões mediterrânicas. No entanto evidencia-se a necessidade de caracterizar as especificidades dos combustíveis florestais mediterrânicos, constituídos essencialmente por combustíveis vivos (Arca, et al., 2007), por forma a obter bons resultados, pelo que vários autores desenvolveram modelos de combustíveis mais adequados à realidade mediterrânica (Dimitrakopoulos, 2002; De Luís, et al., 2004; Cruz, 2005; Cruz & Fernandes, 2008; Fernandes, 2009; Fernandes, et al., 2009; Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011).

Simulações realistas do comportamento de fogo dependem naturalmente da precisão dos dados de entrada, algo, que aliado às limitações do simulador e dos seus modelos de comportamento, podem constituir processos de elevada complexidade (Stratton, 2004).

1.3.1 Parâmetros de Entrada

O simulador FARSITE, faz uso de um conjunto de dados de entrada relativos à topografia, vegetação e condições meteorológicas (Figura 2).

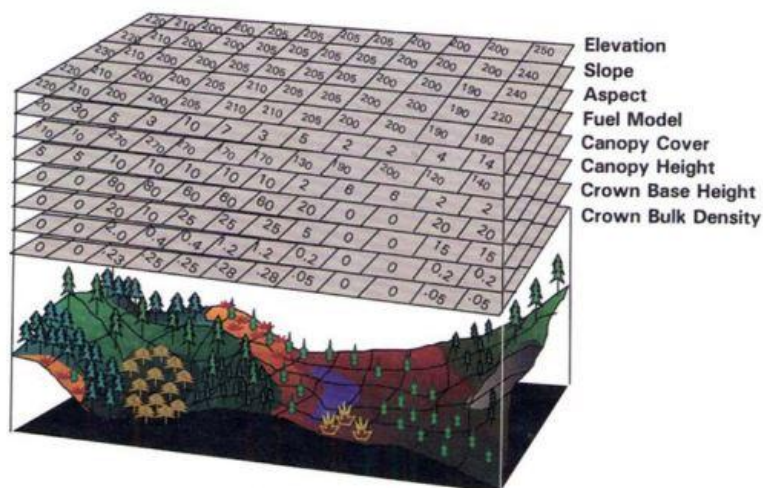


Figura 2 – Dados de entrada, relativos à topografia e vegetação, do simulador FARSITE (Finney, 2004).

A informação geográfica relativa à topografia é indispensável às simulações de comportamento de fogo e engloba 3 *Layers*: elevação (m), declive (°) e orientação de encosta (°). São usadas no ajustamento adiabático de temperatura e humidade utilizando como referência as cotas das estações meteorológicas utilizadas, para avaliar o efeito direto na progressão do fogo, para determinar o ângulo de radiação solar incidente e para transformar a progressão de fogo do nível de superfície para coordenadas horizontais (Finney, 2004).

Os dados relativos à vegetação incluem os mapas de combustível (Fuel Model) e de coberto arbóreo (Canopy Cover, %). Os mapas de coberto arbóreo são utilizados na determinação do ensombramento que influencia o teor de humidade dos combustíveis de superfície (Rothermel, et al., 1986) e no cálculo do fator de redução da velocidade do vento, a partir da intensidade observada nos dados meteorológicos para intensidade ao nível do solo (Albini & Baughman, 1979). Os mapas de combustível fornecem informação acerca do complexo combustível, através da descrição matemática de um conjunto de propriedades (modelo de combustível), e são utilizados na simulação do comportamento do fogo de superfície (Anderson, 1982; Finney, 2004).

O simulador FARSITE compreende um conjunto de modelos de combustível standardizados, incluindo os 13 modelos originais (Anderson, 1982) e os 40 modelos adicionais (Scott & Burgan, 2005), permitindo ainda a customização de modelos. Todos os modelos de combustível incluem o seguinte conjunto de propriedades:

- *Fuel load*, carga de combustível ($t\ ha^{-1}$). Esta propriedade é dividida por combustíveis mortos e vivos. Os combustíveis mortos são subdivididos em 3 *timelag* (1hr, 10hr, 100hr). Os combustíveis vivos são divididos em herbáceos (*herbaceous*) e lenhosos (*woody*).

- *Surface to Volume Ratio*, relação Superfície-Volume (m^{-1}), dividida pelas classes de combustíveis mortos 1hr e combustíveis vivos herbáceos e lenhosos.

- *Fuel bed depth*, espessura da camada de combustível morto (cm).

- *Moisture of Extinction Hx*, teor de humidade de extinção (%).

- *Heat content*, poder calorífico ($kJ\ kg^{-1}$), dividido em combustível morto e vivo.

Para além das 5 *layers* de informação obrigatórias descritas, podem ser adicionadas *layers* opcionais relativas à altura do povoamento arbóreo (*Stand Height*, m), altura da base de copa (*Crown Base Height*, m) e densidade de copa (*Crown Bulk Density*, kg m⁻³), usadas no cálculo do fator de redução da velocidade do vento (Albini & Baughman, 1979) e na modelação de fogo de copa (Van Wagner, 1977; Van Wagner, 1993).

Os temas descritos anteriormente constituem o conjunto de informação geográfica definida no simulador FARSITE como “*Landscape file*”.

Relativamente à vegetação, é ainda necessário fornecer ao simulador, informação do teor de humidade (*fuel moisture*) para cada modelo de combustível antes da ocorrência de incêndio. Esta informação é dividida por combustíveis mortos (1hr, 10hr, 100hr) e vivos (herbáceo e lenhoso), sendo que os segundos são considerados constantes e os primeiros variáveis ao longo do tempo e espaço.

A informação das condições meteorológicas dos dias de ocorrência de incêndio é inserida no simulador em 2 ficheiros ou conjuntos de ficheiros de clima e vento, “*weather files*” e “*wind files*”, respetivamente.

Os ficheiros de clima são constituídos por informação diária de temperaturas de ar (máxima e mínima) e respetivas horas de registo, humidade relativa (máxima e mínima) e precipitação, considerando ainda a cota das estações meteorológicas de onde provêm os registos. Estes dados são usados no cálculo de variações de teor de humidade em combustíveis mortos, ao longo do tempo e espaço (Finney, 2004).

Por sua vez, os ficheiros de vento são constituídos por informação horária de velocidade de vento, direção de vento e nebulosidade. Os vetores que definem as condições de vento podem ser considerados constantes em toda a área considerada ou esta pode ser dividida em células, cada uma com condições de vento próprias (Salis, 2007), constituindo os ficheiros designados por “*gridded wind*”. Os ficheiros “*gridded wind*” são elaborados a partir de modelos de simulação de ventos influenciados pelo terreno, como o WindNinja (Forthofer, et al., 2009).

O simulador FARSITE considera ainda um fator de ajustamento (*Adjustment factor*) o que possibilita o ajuste da taxa de propagação para modelos de combustível específicos.

Para cada simulação efetuada é necessário definir os parâmetros do modelo, o tipo de comportamento a modelar e a duração do incêndio. Os parâmetros são definidos por unidade de tempo (*time step*), unidades de tempo visíveis (*visible steps*), resolução de perímetro (*perimeter resolution*) e resolução de distância (*distance resolution*). O tipo de comportamento do fogo a modelar permite simular progressão de fogo de superfície, fogo de copa e saltos de fogo.

Por fim, é possível definir a informação a exportar das simulações (*outputs*). Para além da informação geográfica, em formato vetorial, do perímetro de incêndio, incluindo a evolução temporal, podem ainda ser exportados 8 temas em formato *raster*:

- *Time of Arrival*, Tempo de chegada (horas)
- *Fireline Intensity*, Intensidade da frente de fogo (kW/m)
- *Flame Length*, Comprimento de chama (m)
- *Rate of Spread*, Taxa de propagação (m/min)
- *Heat/Area*, Calor/Área (kJ/m²)
- *Reaction Intensity*, Intensidade de reação (kW/m²)
- *Crown Fire Activity*, Atividade de fogo de copa (superfície, passivo, ativo)
- *Spread Direction*, Direcção de propagação (°)

Na Figura 3 pode observar-se o aspeto geral do funcionamento do simulador FARSITE.

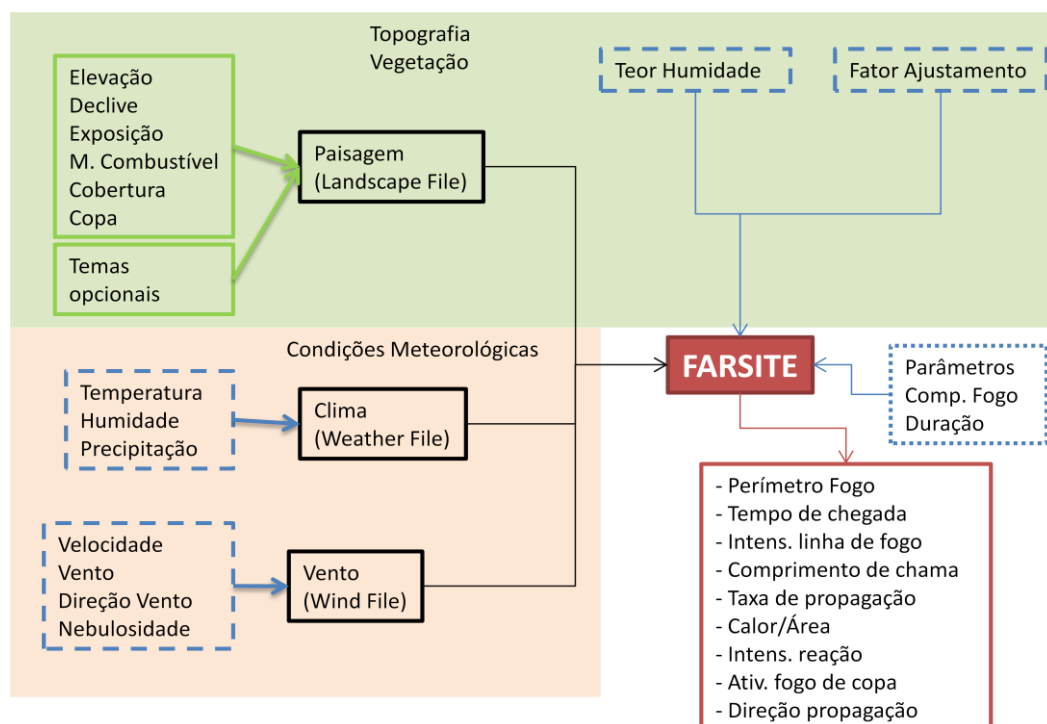


Figura 3 – Dados de entrada e *output* do simulador FARSITE.

1.3.2 Técnica de Propagação e Modelos de Comportamento de Fogo

O simulador FARSITE utiliza a técnica de propagação de onda elíptica (*elliptical wave propagation*), na simulação de expansão do fogo, baseada no princípio de Huygens (Anderson, et al., 1982).

O perímetro de fogo considera-se composto por uma série de pontos, ou vértices, espacialmente regulares, dos quais se inicia nova e independente ignição (Anderson, et al., 1982). Como tal, a frente de fogo é propagada como um polígono em expansão, definido, a cada unidade de tempo, pela união dos vértices propagados por formas elípticas. O número de vértices aumenta com a expansão do perímetro de fogo. A Figura 4 exemplifica o princípio de Huygens (Anderson, et al., 1982) e permite verificar a influência das condições ambientais na forma, dimensão e direção das elipses.

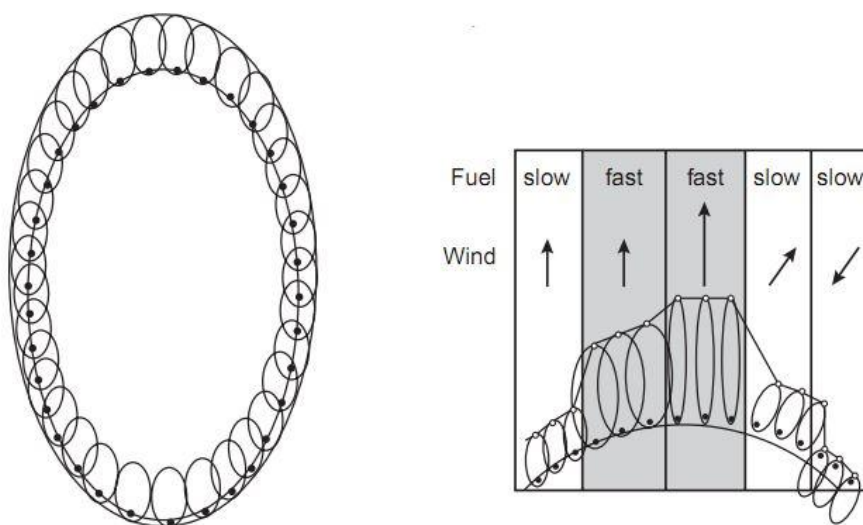


Figura 4 – Ilustração do princípio de Huygens através de ondas elípticas, em condições uniformes e não uniformes (Finney, 2004).

A implementação do princípio de Huygens no simulador FARSITE faz-se através da técnica de Richards (1995), adaptada de forma a transformar as coordenadas horizontais em coordenadas ao nível da superfície (Finney, 2004).

Os modelos de comportamento de fogo são aplicados a pontos geográficos definidos, pelo que a técnica de propagação de onda elíptica (Richards, 1995) assenta perfeitamente na modelação pretendida. Assim, as variáveis ambientais que caracterizam os vértices do perímetro de fogo são usadas para calcular o comportamento de fogo (Finney, 2004).

O comportamento do fogo de superfície é simulado a partir das equações do modelo semi-empírico de Rothermel (1972). O modelo compreende o cálculo da taxa de propagação e da intensidade da frente de fogo consoante as seguintes expressões:

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}}$$

onde:

R = taxa de propagação, m min^{-1}

I_R = intensidade de reação, $\text{kJ min}^{-1} \text{m}^{-2}$

ξ = taxa de fluxo de propagação

ρ_b = densidade de volume seco, kg m^{-3}

ε = número de aquecimento eficiente

Q_{ig} = calor de pré-ignição, kJ kg^{-1}

ϕ_w = coeficiente de vento

ϕ_s = coeficiente de declive

Equação 1 – Modelo semi-empírico de Rothermel, taxa de propagação R (m min^{-1})

$$I_b = hwR/60$$

onde:

I_b = intensidade da frente de fogo, kW m⁻¹

h = rendimento calorífico do combustível, kJ kg⁻¹

w = peso de combustível por unidade de área, kg m⁻²

$R/60$ = taxa de propagação convertida para m s⁻¹

Equação 2 – Modelo semi-empírico de Rothermel, intensidade frente de fogo I_b (kW m⁻¹)

As características calculadas pelas equações anteriores estão dependentes das condições de vento, topografia e características dos combustíveis (modelos de combustível), pelo que estas devem estar sempre disponíveis para qualquer ponto da área de simulação (Finney, 2004).

Consoante as características da estrutura combustível, um fogo de superfície pode evoluir para um fogo de copas. No simulador FARSITE é utilizado o modelo desenvolvido por Van Wagner (1977, 1993) para simular o comportamento do fogo de copas. O modelo determina se o fogo de superfície se mantém ou transita para fogo de copas e se este se propaga ativamente pelas copas ou se atinge pontualmente as árvores (Finney, 2004). O simulador permite ainda a modelação de fogo de copas através do método de Scott & Reinhardt (2001).

Para simular o comportamento de saltos de fogo é utilizado um modelo baseado nas equações de Albini (1979).

Outros modelos estão inseridos no simulador FARSITE para simular outros tipos de comportamento do fogo (aceleração de fogo e combustão pós-frontal).

2 METODOLOGIA

Com este capítulo pretende-se explicitar os processos metodológicos que precedem as simulações de comportamento e progressão do fogo, a caracterização da área de estudo, dados e materiais utilizados, assim como a análise estatística utilizada.

2.1 Área de Estudo

O presente trabalho tem o seu foco na área da Serra de Portel, situada no concelho de Portel, distrito de Évora, Portugal (Figura 5).

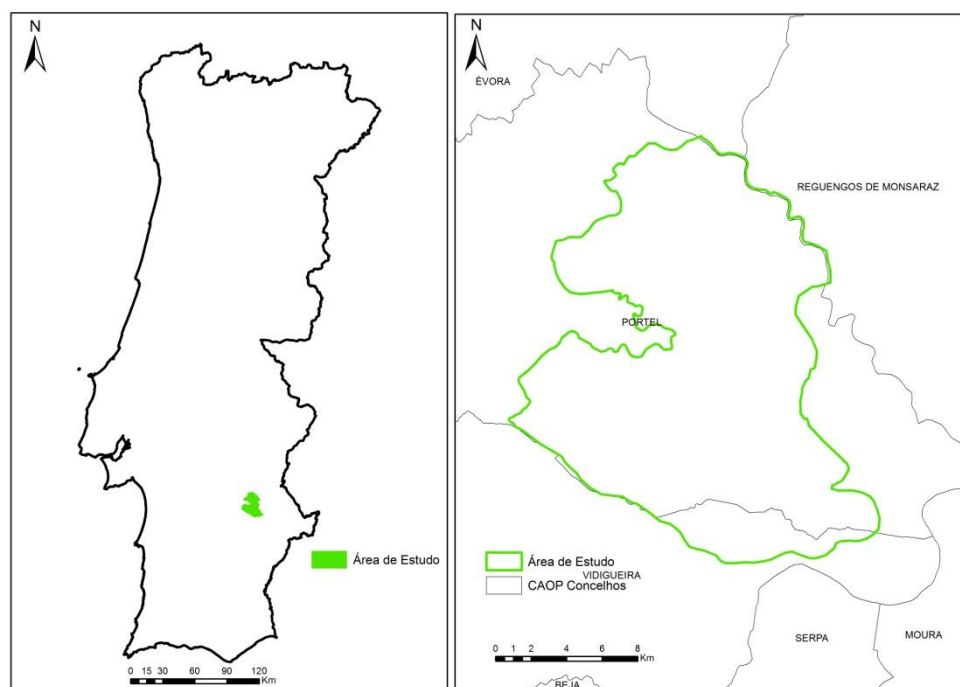


Figura 5 - Localização da área de estudo, Serra de Portel.

Com uma área de cerca de 29.000 hectares, a Serra de Portel, englobada na grande bacia do Guadiana, surge como uma pequena elevação na vasta peneplanície do Alentejo central. Com uma altitude máxima de 420 metros, apresenta, na sua maioria, solos xistosos de declives acentuados e relevo ondulado com uma rede de drenagem apertada(Feio & Martins,

1993). A sua baixa altitude não lhe permite uma marcada influência oceânica, sendo a sua superfície definida pelo seco clima mediterrânico, com verões quentes e de baixa pluviosidade e invernos chuvosos de temperaturas acentuadamente baixas (Beliz, 1990).

Toda a região é constituída por vastas áreas de montado de sobro e azinho, muitas vezes acompanhados por matos ou matagais, que também podem surgir isolados, resultantes do abandono das terras. Na zona verificam-se, também, consideráveis extensões de olivais tradicionais e plantações florestais de eucalipto e pinheiro manso, este último em menor expressão.

2.2 Materiais e Dados

2.2.1 Casos de estudo

Da análise dos perímetros de incêndios ocorridos na área de estudo desde o ano de 1990, foram selecionados 4, de diferentes anos, ocorridos no período de Verão, os quais se encontram representados na Figura 6.

A escolha deveu-se, essencialmente, à informação geográfica e fitossociológica disponível para cada um.

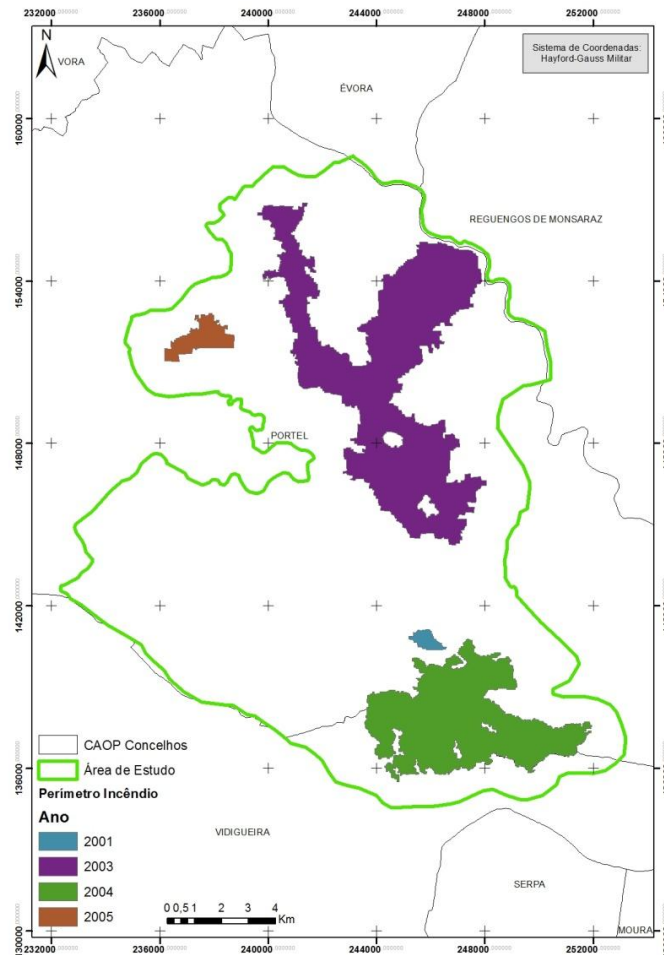


Figura 6 – Localização dos perímetros de incêndio dos casos de estudo.

De seguida descrevem-se em mais pormenor os casos de estudo considerados.

2001 - Monte Novo

Este fogo ocorreu 6 km a noroeste da aldeia de Alqueva, perto da Herdade do Monte Novo, nos dias 24 e 25 de Junho de 2001 e estendeu-se por uma área de sensivelmente 60 hectares (Figura 7).



Figura 7 – Perímetro de incêndio do caso de estudo 2001.

O alerta foi dado às 15:00 horas do dia 24 de Junho e o incêndio foi considerado extinto às 3:00 horas do dia 25 de Junho (ICNF, 2010). Com uma progressão auxiliada por vento dominante de sudeste e segundo o CDOS de Évora, o incêndio consumiu, na sua maioria, mato, sobreiros e azinheiras.

Segundo inventários fitossociológicos efetuados perto da zona do caso de estudo sugerem um mato dominado por espécies como a esteva (*Cistus ladanifer* L.), o tojo (*Genista hirsuta* L.), o rosmaninho (*Lavandula luisieri* (Rozeira) Rivaz- Martinez), o medronheiro (*Arbutus unedo* L.) e o trovisco (*Daphne gnidium* L.), características de associações fitossociológicas sub-seriais da floresta clímax de sobreiro (Beliz, 1990; Paixão, 2008).

2003 - Milha

O caso de estudo é referente a um incêndio ocorrido entre os dias 2 e 7 de Agosto de 2003, ano em que as condições de seca extrema atingiram todo o país (Pereira, et al., 2005; Trigo, et al., 2006), registando-se um aumento significativo na área ardida em comparação com outros anos. Com vento dominante de sul o incêndio consumiu áreas de mato, sobreirais, azinhais, eucaliptais, pinhais e áreas de pastagem e estendeu-se por uma área superior a 3800 hectares, desde o Monte da Milha, freguesia de Amieira até ao Monte do Peral, freguesia de Monte do Trigo, tornando-se o incêndio de maior extensão registado no município de Portel (Figura 8).



Figura 8 – Perímetro de incêndio do caso de estudo 2003.

O alerta foi dado às 15:00 horas do dia 2 de Agosto e o incêndio foi considerado extinto às 2:00 horas do dia 7 de Agosto (ICNF, 2010). Para além das espécies arbóreas como o sobreiro, azinheira, eucalipto e pinheiro manso e dos pastos constituídos por plantas anuais, toda a área apresentava

forte presença de matos, isolados ou como sub-coberto, dominados por espécies como a esteva (*Cistus ladanifer* L.), o sargaço (*Cistus salvifolius* L.) o tojo (*Genista hirsuta* L.), o medronheiro (*Arbutus unedo* L.), o rosmaninho (*Lavandula luisieri* (Rozeira) Rivaz- Martinez), e o trovisco (*Daphne gnidium* L.), sendo as 4 primeiras as mais abundantes e características das formações vegetais da zona (Beliz, 1990).

2004 - Monte Santos

O incêndio em questão ocorreu entre os dias 12 e 15 de Julho de 2004, percorrendo uma área superior a 2100 hectares, tornando-o uns dos maiores incêndios registados no município de Portel (Figura 9).

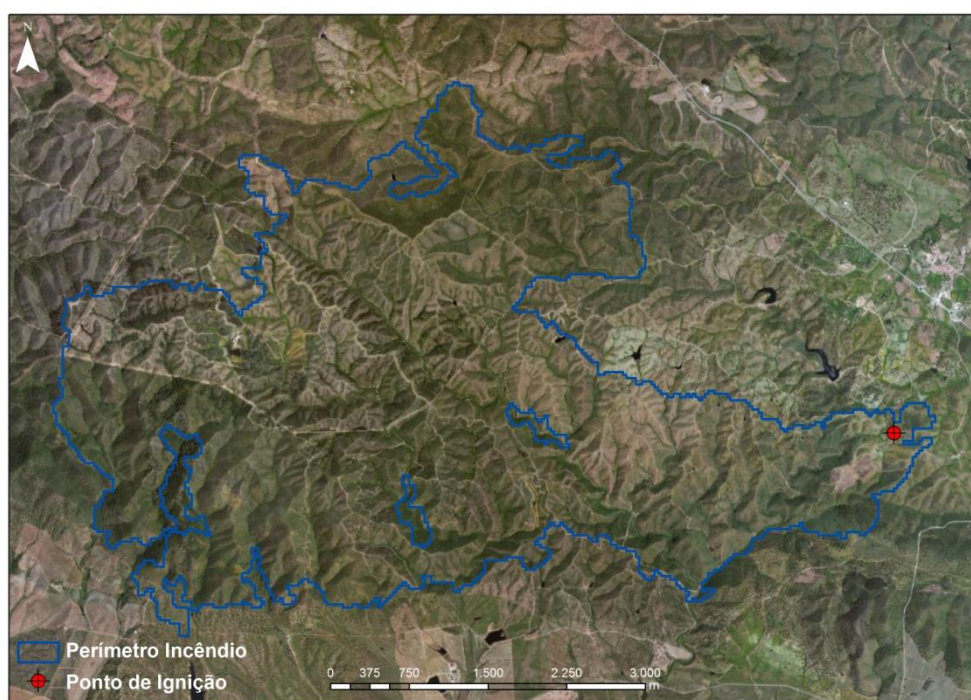


Figura 9 – Perímetro de incêndio do caso de estudo 2004.

O alerta foi dado às 12:00 horas do dia 12 de Julho e foi considerado extinto às 23:00 horas do dia 15 de Julho (ICNF, 2010). Auxiliado por ventos dominantes de este e sudeste o incêndio consumiu áreas de mato, sobreirais, eucaliptais e pinhais.

Segundo estudos efetuados na área (Beliz, 1990) os matos, isolados ou como sub-coberto, da zona, caracterizam-se pelo domínio de espécies como a esteva (*Cistus ladanifer* L.), o sargaço (*Cistus salvifolius* L.) o tojo (*Genista hirsuta* L.) e o medronheiro (*Arbutus unedo* L.), embora possam surgir, pontualmente, espécies companheiras como as urzes (*Erica* sp.) e a murta (*Myrtus communis* L.) em zonas de vale e o lentisco-bastardo (*Phillyrea angustifolia* L.) em zonas de encosta.

2005 - São Pedro

O incêndio do caso em questão ocorreu 3 km a norte da vila de Portel, perto da ermida de São Pedro entre os dias 3 e 5 de Agosto de 2005 e estendeu-se por uma área de cerca de 210 hectares (Figura 10).

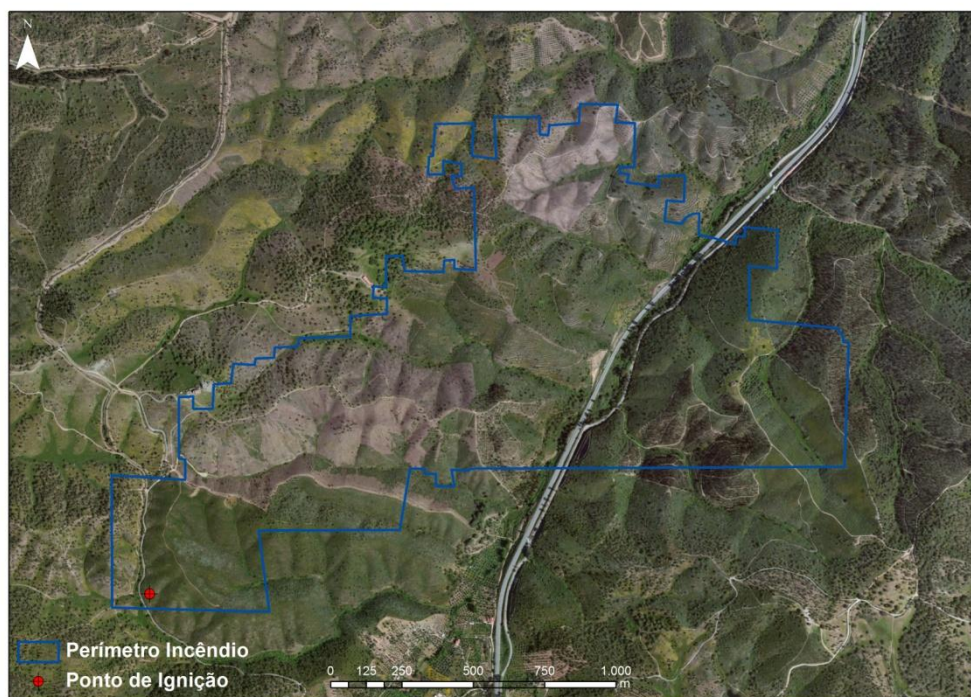


Figura 10 – Perímetro de incêndio do caso de estudo 2005.

O alerta foi dado às 16:00 horas do dia 3 de Agosto e o incêndio foi considerado extinto às 2:00 horas do dia 5 de Agosto (ICNF, 2010). Auxiliado

por ventos dominantes de oeste e sudoeste o incêndio consumiu áreas de mato, sobreiros e uma pequena mancha de eucalipto.

Os inventários fitossociológicos efetuados perto da zona do caso de estudo sugerem a existência de matos dominados por espécies como a esteva (*Cistus ladanifer* L.), o tojo (*Genista hirsuta* L.) e o rosmaninho (*Lavandula luisieri* (Rozeira) Rivaz- Martinez) características de associações fitossociológicas sub-seriais da floresta clímax de sobreiro. Pontualmente surgem também, o medronheiro (*Arbutus unedo* L.) e a giesta (*Cytisus baeticus* (Webb) Steudel) (Beliz, 1990; Paixão, 2008).

2.2.2 Dados geográficos e climáticos

Com vista a integração nos modelos de simulação, foram analisados e sistematizados dados geográficos (Tabela 2) e meteorológicos (Tabela 3).

Informação Geográfica	Fonte	Escala	Sistema de Projeção	Formato
CAOP 2013	IGP	1:250000	ETRS89	SHP
COS90	IGP	1:25000	Lisboa Hayford Gauss IGeoE	SHP
Altimetria	CM Portel	1:25000	Lisboa Hayford Gauss IGeoE	SHP
IFN4 - Inventário Florestal Nacional 4 (1995-98)	ICNF	-	-	MDB
Perímetros Incêndio	ICNF	-	Lisboa Hayford Gauss IGeoE	SHP

Tabela 2 – Lista de dados geográficos utilizados.

Dados Climáticos	Fonte	Estação	Ano
Precipitação Diária (mm)	SNIRH	Alvito	2001; 2003; 2004; 2005
Temperatura do ar horária (°C)	SNIRH	Alvito	2001; 2003; 2004; 2005
Humidade relativa horária (%)	SNIRH	Alvito	2001; 2003; 2004; 2005
Velocidade de vento horária (m/s)	SNIRH	Alvito	2001
		Portel	2003; 2004; 2005
Direção de vento horária (°)	SNIRH	Alvito	2001
		Portel	2003; 2004; 2005

Tabela 3 – Lista de dados meteorológicos utilizados.

2.2.3 Parâmetros de simulação

Todos os dados de entrada foram gerados através da informação referenciada nas Tabela 2 e Tabela 3. As diferentes *layers raster* de informação geográfica foram armazenadas e editadas através do software ArcGIS 10.1, com uma resolução espacial de 15 m. Foram posteriormente convertidas para o formato *ASCII Raster Grid* de forma a serem suportadas pelo simulador.

O Modelo Digital de Elevações (MDE) foi determinado a partir dos dados de altimetria (Tabela 2), através da função TIN, o qual foi posteriormente convertido em formato *raster*. Foi também gerado outro mapa de elevações, através da função *Topo to Raster*, uma ferramenta de interpolação com o objetivo de criar mapas de elevação hidrologicamente corretos (ESRI, 2012). Ambos os *rasters* de elevação serviram de base na criação dos mapas de declive e orientação de encosta (Figura 11; Figura 12).

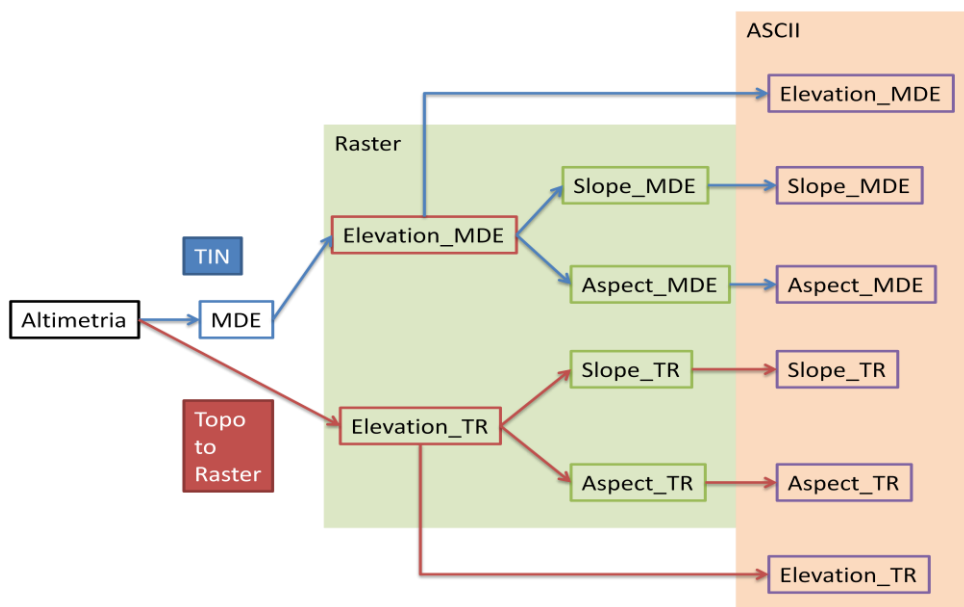


Figura 11 – Esquema do processo de elaboração dos dados de entrada FARSITE, relativos à topografia.

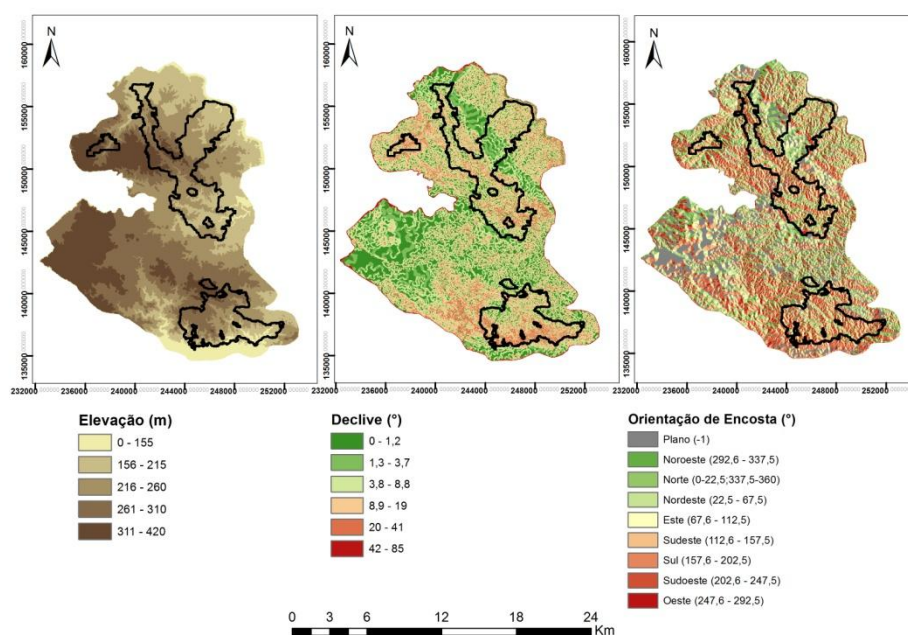


Figura 12 – Aspeto geral da elevação, declive e orientação de encosta, gerados pela função TIN da área de estudo.

Para caracterizar as condições meteorológicas dos dias em que ocorreram os incêndios dos casos de estudo, foram consultados no Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), os dados diários de precipitação, assim como os dados horários de temperatura do ar, humidade relativa e direção e velocidade do vento, da estação meteorológica mais próxima das áreas em questão (Tabela 3).

Para gerar os ficheiros de clima para cada caso de estudo foram considerados, em cada dia, os valores de temperaturas de ar máxima e mínima, humidade relativa máxima e mínima e precipitação diária. Foram também consideradas as horas do dia a que se registaram as temperaturas máxima e mínima, bem como a cota da estação meteorológica (Figura 13).

MO	DY	RN	AM	PM	TLo	THi	HHi	HLo	ELV	(rt1	rt2)
06	23	00	0500	1800	16	33	22	72	200		
06	24	00	0600	1600	18	33	26	71	200		
06	25	00	0700	1600	14	27	35	99	200		
06	26	00	0400	1500	13	24	42	94	200		

Figura 13 – Exemplo de ficheiro de clima, caso de estudo 2001 – Monte Novo.

Os dados horários de velocidade de vento foram convertidos de m/s para km/h e, juntamente com os dados de direção de vento, permitiram a construção dos ficheiros de vento para cada caso de estudo. Os ficheiros com os dados de vento foram gerados através do software WindNinja 2.1.3, no sentido de integrar o efeito da rugosidade do terreno (Forthofer, et al., 2009). Uma vez que não foram encontrados dados acerca da nebulosidade, considerou-se o valor “oo” para todos dias de ocorrência de incêndios.

Para a carta de combustíveis e carta de coberto arbóreo foram utilizados dados da Carta de Ocupação do Solo na escala 1:25000 (COS90) e do Inventário Florestal Nacional (IFN). Parte da área de estudo não estava abrangida pela COS90, pelo que foi necessário a vectorização de polígonos diferenciadores da ocupação do solo para essa zona, através de fotointerpretação sobre cobertura aérea de 2011. A ocupação do solo foi corrigida onde se verificou essa necessidade, tendo em conta a diferença das datas dos dados base e a dinâmica da vegetação, fornecendo informação acerca da continuidade horizontal de combustível. Posteriormente, toda a região foi revista e corrigida com base no IFN. A partir desta carta de ocupação e considerando a informação fitossociológica recolhida na bibliografia (Beliz, 1990; Paixão, 2008), foram atribuídos a cada polígono, os modelos de combustível para cada sistema considerado (Anderson, 1982; Scott & Burgan, 2005; Fernandes, et al., 2009; Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011) e valores de coberto arbóreo (%).

Os 13 modelos de combustível originais desenvolvidos por Anderson (1982) distribuem-se por 4 grupos (herbáceo, matos, folhada e resíduos florestais) relacionados com a orientação dos combustíveis (vertical ou horizontal) e a sua carga distribuída pelas classes de dimensão. No sentido de aumentar as opções de aplicação de modelos de combustível, Scott & Burgan (2005) desenvolveram 40 modelos de combustível adicionais,

considerando o tipo de combustível condutor do fogo (Não inflamável, herbáceo, herbáceo-arbustivo, arbustivo, folhada proveniente do copado, folhada morta lenhosa e resíduos florestais/queda de árvores). Nestes modelos, as cargas herbáceas viva e morta são dinâmicas e estão dependentes do teor de humidade dos combustíveis herbáceos vivos.

No sentido de caracterizar a vegetação arbustiva e florestal com maior expressão em Portugal continental, Fernandes, et al. (2009) desenvolveram 18 modelos de combustível agrupados consoante o estrato responsável pela propagação da frente de fogo (folhada, folhada/vegetação, vegetação) e pelo seu grau de coberto e altura. Por sua vez, no sentido de melhorar a caracterização dos combustíveis da região da Andalusia, Espanha, Rodríguez y Silva & Molina-Martínez (2011) elaboraram um conjunto de 36 modelos de combustível baseando-se nos modelos desenvolvidos por Scott & Burgan (2005).

A atribuição dos modelos de combustível aos complexos vegetais acentou, em parte, no conhecimento empírico da região, conferindo um aspecto de subjectividade à própria metodologia, no entanto vários autores (Finney, 2000; Scott & Burgan, 2005) defendem tal facto como fundamental para compreender o comportamento do fogo em determinada região.

Para cada conjunto de modelos de combustível, fica um resumo das atribuições efectuadas:

- Modelos de combustível de Anderson, 1982 - **Fuel Model 1** (Culturas anuais de sequeiro, montado de sobre e/ou azinho com pastagens no subcoberto, pastagens); **Fuel Model 2** (Montado de sobre e/ou azinho com pastagens no subcoberto); **Fuel Model 4** (Matos e Matagais isolados ou como subcoberto); **Fuel Model 5** (Matos e Matagais isolados ou como subcoberto); **Fuel Model 6** (Matos e Matagais isolados ou como subcoberto).

- Modelos de combustível de Scott & Burgan, 2005 – **GR₁** (Culturas anuais de sequeiro, montado de sobre e/ou azinho com pastagens no subcoberto, pastagens); **GR₂** (Pastagens); **GR₄** (Culturas anuais de sequeiro, montado de sobre e/ou azinho com pastagens no subcoberto); **GS₁** (Montado de sobre e/ou azinho com pastagens e matos baixos no subcoberto); **SH₁** (Matos); **SH₂** (Matos); **SH₅** (Matos e matagais); **SH₆** (Matos e matagais); **SH₇** (Matos e matagais).

- Modelos de combustível de Fernandes, et al., 2009 – **M-CAD** (Folhosas ribeirinhas); **M-EUC** (Eucaliptais); **M-EUCd** (Eucaliptais); **M-PIN** (Pinhais); **V-Hb** (Culturas anuais de sequeiro, montado de sobre e/ou azinho com pastagens no subcoberto, pastagens); **V-MAa** (Matos e matagais); **V-MAb** (Matos e matagais); **V-MMb** (Matos e matagais).

- Modelos de combustível do sistema UCO₄₀ (Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011) – **P₁** (Pastagens); **P₃** (Culturas anuais de sequeiro, montado de sobre e/ou azinho com pastagens no subcoberto); **P₄** (Culturas anuais de sequeiro, montado de sobre e/ou azinho com pastagens no subcoberto); **PM₃** (Matos e Matagais); **PM₄** (Matos); **M₃** (Matagais); **M₇** (Matos e Matagais como subcoberto); **M₉** (Matos e Matagais como subcoberto); **HPM₂** (Matos e matagais); **HPM₃** (Eucaliptais); **HPM₄** (Pinhais).

Daqui foram exportados os mapas de combustível individualmente, bem como o mapa de coberto arbóreo, e posteriormente convertidos para o formato *ASCII Raster Grid* (Figura 14).

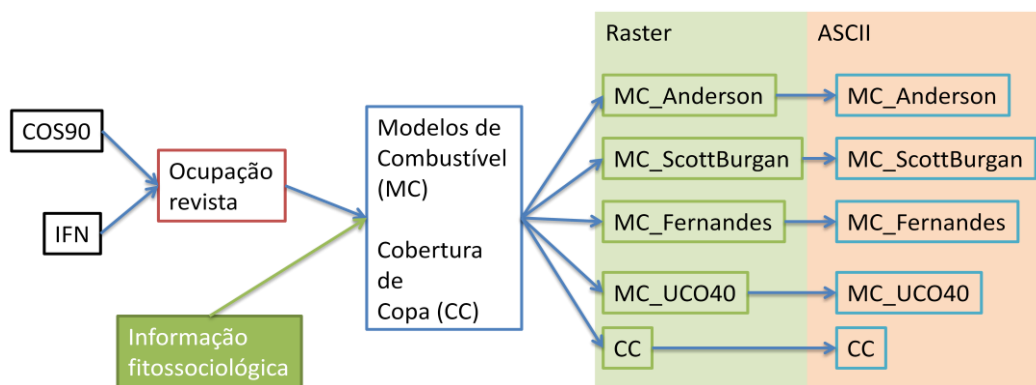


Figura 14 – Esquema do processo de elaboração dos mapas de combustível e coberto arbóreo.

Como referido anteriormente, o simulador FARSITE já inclui os 13 modelos de combustível originais (Anderson, 1982) e os 40 modelos adicionais (Scott & Burgan, 2005), no entanto permite a criação de modelos customizados, pelo que foram criados os ficheiros dos 18 modelos desenvolvidos por Fernandes, et al., (2009) e dos 36 modelos pertencentes ao sistema UCO40 (Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011), a partir das Tabela 4 e Tabela 5.

Nº Mod. Comb.	Código Modelo Comb.	Carga (t ha ⁻¹)					SVR (m ⁻¹)			Exposs. (cm)	Hx (%)	HC (kJ kg ⁻¹)	
		1hr	10hr	100hr	herb.	len.	1hr	herb.	len.			dead	live
211	F-EUC	4.64	2.96	1.28	0.00	1.12	41	41	49	32.00	26	20969	20469
212	F-FOL	2.67	1.28	0.69	0.00	1.17	45	54	49	14.94	25	20469	20469
213	F-PIN	6.50	1.50	0.00	0.00	0.00	54	54	54	10.06	45	20469	21469
214	F-RAC	3.74	2.00	1.01	0.00	1.19	64	49	45	4.88	28	20469	20469
221	M-CAD	4.55	1.86	0.61	0.00	9.08	60	49	49	63.09	29	19970	19970
222	M-ESC	5.65	1.50	0.47	0.00	7.89	49	49	54	49.99	27	20469	20469
223	M-EUC	8.36	3.81	0.00	0.00	4.51	47	41	49	64.01	32	20969	20969
224	M-EUCd	1.37	2.89	1.59	0.00	1.84	45	41	49	39.93	26	20969	20469
225	M-F	4.51	1.50	0.49	2.35	0.47	60	79	45	29.87	34	19471	19471
226	M-H	2.71	1.01	0.00	0.65	0.09	54	79	45	10.06	29	20469	20469
227	M-PIN	7.22	3.00	0.00	0.00	6.88	54	54	60	49.99	40	20469	21469
231	V-Ha	0.49	0.09	0.00	2.51	0.29	39	60	39	60.05	23	18972	18972
232	V-Hb	0.29	0.00	0.00	1.21	0.00	60	60	60	35.05	23	18972	18972
233	V-MAa	9.50	2.51	0.00	0.00	14.50	35	39	39	104.85	34	20969	20969
234	V-MAb	6.01	0.49	0.00	0.00	7.51	45	45	45	49.99	34	20969	20969
235	V-MH	1.01	1.01	0.00	1.50	5.49	45	85	39	54.86	25	19471	19471
236	V-MMa	6.01	3.99	0.00	0.00	13.00	24	29	29	170.08	23	20469	20469
237	V-MMb	3.99	0.49	0.00	0.00	6.99	29	29	29	89.92	20	20469	20469

Tabela 4 - Parâmetros dos modelos de combustível desenvolvidos por **Fernandes, et al., 2009**. SVR – relação Superfície-Volume (Surface to Volume Ratio); Hx – teor de humidade de extinção (Moisture of Extinction); HC – poder calorífico (Heat Content).

Nº Mod. Comb.	Código Mod. Comb.	Carga (t ha ⁻¹)					SVR (m ⁻¹)			Express. (cm)	Hx (%)	HC (kJ kg ⁻¹)	
		1hr	10hr	100hr	herb.	len.	1hr	herb.	len.			dead	live
14	P1	1.75	0.00	0.00	0.00	0.00	124	124	124	30.48	11	18608	18608
15	P2	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	124	124	124	30.48	11	18608	18608
16	P3	2.39	0.00	0.00	0.00	0.00	124	124	124	45.72	11	18608	18608
17	P4	3.85	0.00	0.00	0.00	0.00	124	124	124	36.58	11	18608	18608
18	P5	0.63	0.00	0.00	3.90	0.00	124	124	124	79.25	11	18608	18608
19	P6	5.41	0.00	0.00	0.00	0.00	124	124	124	76.20	11	18608	18608
20	P7	6.72	0.00	0.00	0.00	0.00	59	59	59	85.34	25	18608	18608
21	P8	5.55	0.00	0.00	1.85	0.00	59	59	59	121.92	25	18608	18608
22	P9	9.20	0.00	0.00	13.78	0.00	59	59	59	121.92	25	18608	18608
23	PM1	4.43	2.05	0.00	0.00	2.14	82	82	82	30.48	14	18608	18608
24	PM2	10.03	5.02	2.48	0.00	4.82	82	82	82	60.96	14	18608	18608
25	PM3	9.25	5.41	1.12	0.49	4.43	98	98	98	36.58	20	18608	18608
26	PM4	19.58	9.79	4.87	1.07	8.23	85	85	85	60.96	20	18608	18608
27	M1	2.73	0.00	0.00	0.00	7.36	68	68	68	30.48	20	18608	18608
28	M2	9.59	0.00	3.31	0.00	7.40	68	68	68	30.48	20	18608	18608
29	M3	11.45	2.87	3.36	0.00	6.09	72	72	72	82.30	40	18608	18608
30	M4	6.96	15.83	4.43	0.00	5.07	52	52	52	100.58	40	18608	18608
31	M5	17.68	6.09	3.02	0.00	10.52	49	49	49	161.54	20	18608	18608
32	M6	6.23	4.29	0.00	1.12	5.94	72	72	72	121.92	25	18608	18608
33	M7	22.26	11.98	5.94	0.00	13.25	65	65	65	173.74	20	18608	18608
34	M8	11.20	6.09	3.46	0.00	7.26	75	75	75	121.92	25	18608	18608
35	M9	34.63	9.84	4.92	0.00	18.85	65	65	65	182.88	20	18608	18608
36	HPM1	4.43	2.92	0.00	0.00	2.97	65	65	65	30.48	14	18608	18608
37	HPM2	7.99	5.26	0.00	0.00	5.31	65	65	65	30.48	14	18608	18608
38	HPM3	8.82	6.77	1.07	0.00	7.16	57	57	57	60.96	40	18608	18608
39	HPM4	17.58	13.20	1.17	0.00	11.11	57	57	57	76.20	40	18608	18608
40	HPM5	20.46	16.07	1.36	0.00	10.72	65	65	65	85.34	25	18608	18608
41	HR1	2.43	0.73	4.09	0.00	0.00	65	65	65	3.05	29	18608	18608
42	HR2	4.53	1.41	0.20	0.00	0.00	82	82	82	6.10	25	18608	18608
43	HR3	1.22	0.34	2.05	0.00	0.00	65	65	65	3.05	29	18608	18608
44	HR4	1.22	0.29	2.19	0.00	0.00	82	82	82	12.19	25	18608	18608
45	HR5	2.82	0.88	4.73	0.00	0.00	65	65	65	6.10	29	18608	18608
46	HR6	7.01	3.31	0.34	0.00	0.00	82	82	82	12.19	25	18608	18608
47	HR7	0.73	3.75	3.46	0.00	0.00	65	65	65	18.29	25	18608	18608
48	HR8	7.11	1.22	5.55	0.00	0.00	65	65	65	6.10	25	18608	18608
49	HR9	14.17	9.35	5.84	0.00	0.00	82	82	82	18.29	25	18608	18608

Tabela 5 – Parâmetros dos modelos de combustível do sistema UCO40 (**Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011**). SVR – relação Superfície-Volume (Surface to Volume Ratio); Hx – teor de humidade de extinção (Moisture of Extinction); HC – poder calorífico (Heat Content).

Foram assim criados 4 mapas de combustível, cada um correspondente a cada grupo de modelos de combustível (Figura 15; Figura 16; Figura 17; Figura 18).

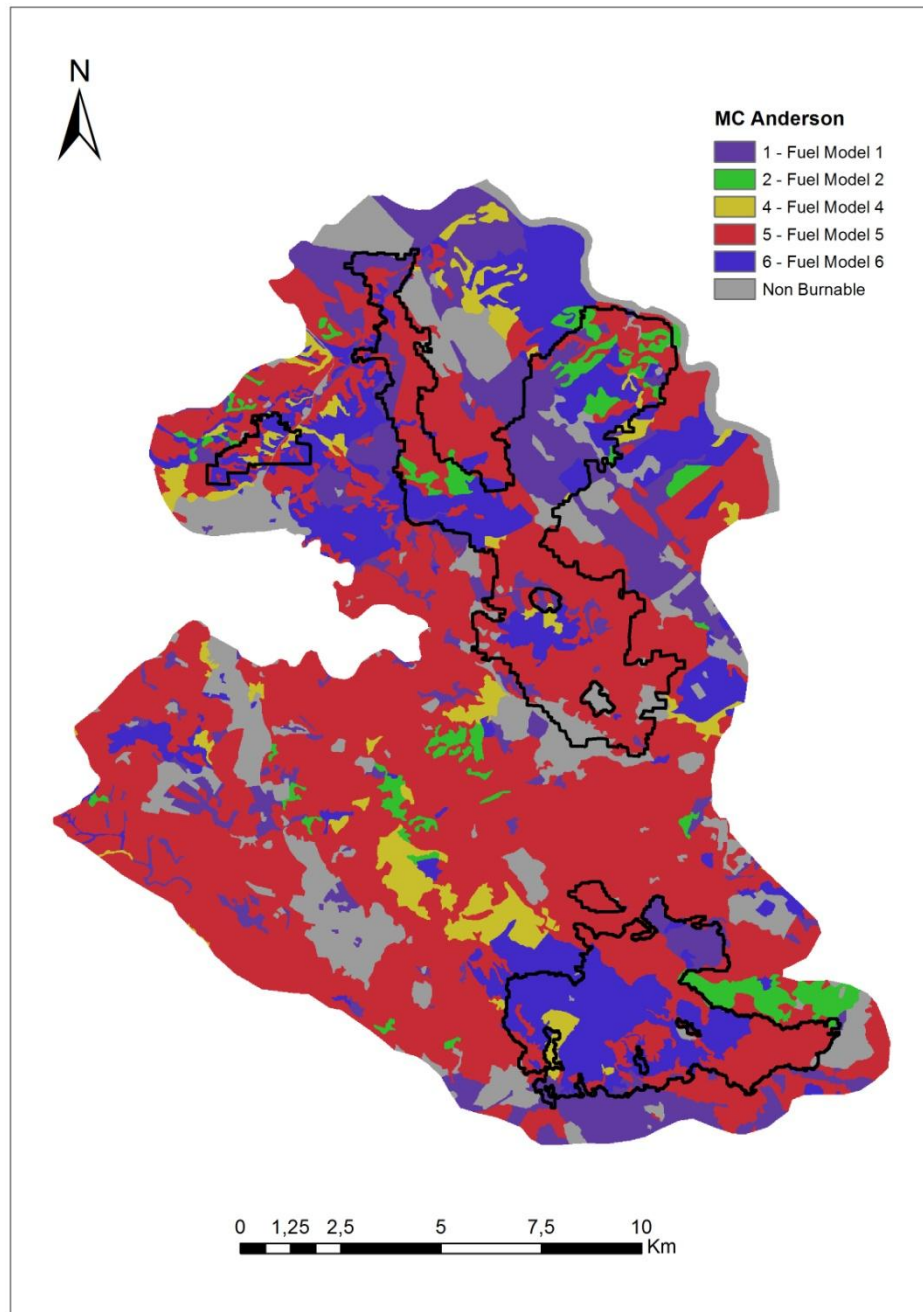


Figura 15 – Mapa de combustível para o cenário de modelos de combustível de Anderson, 1982.

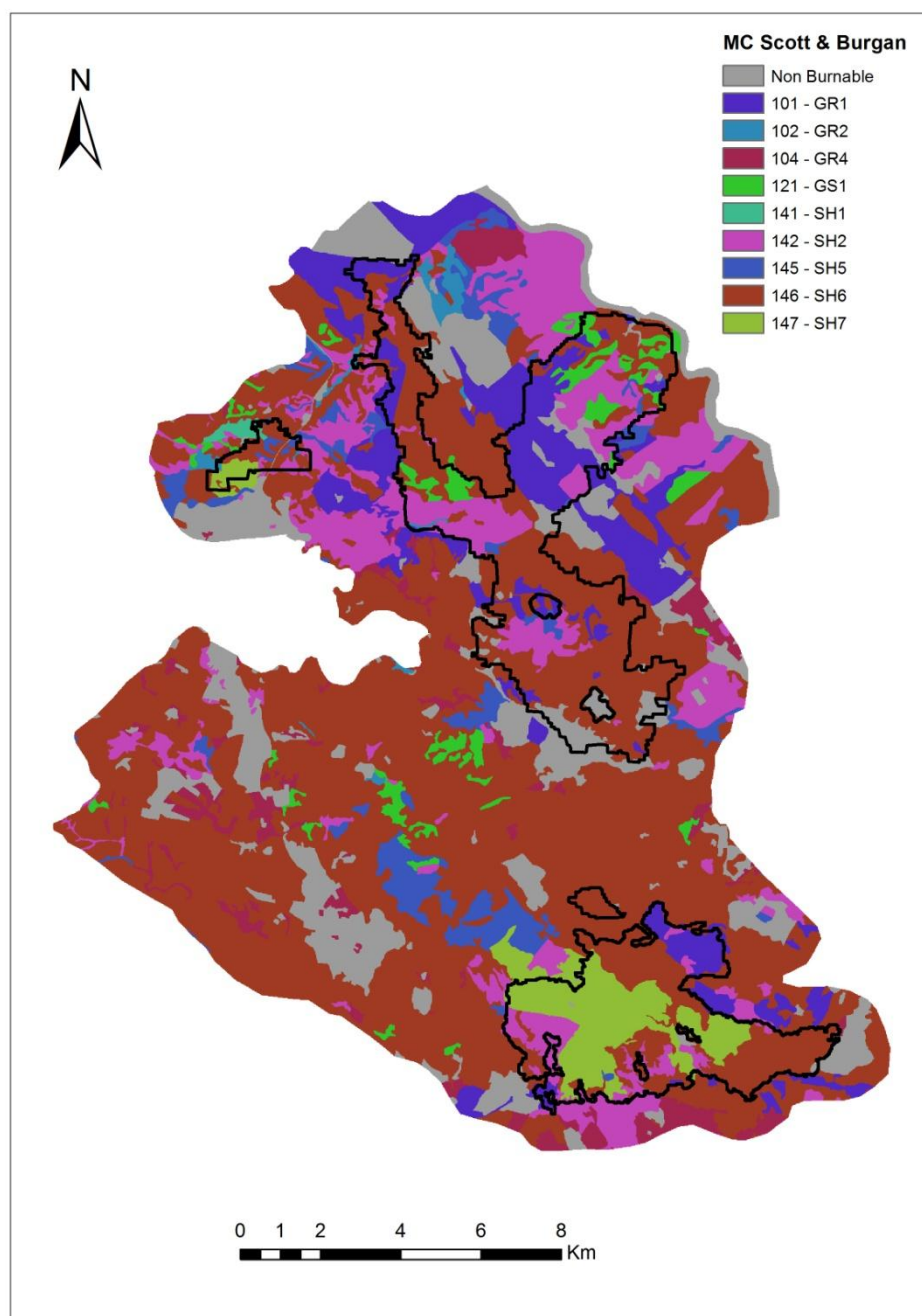


Figura 16 - Mapa de combustível para o cenário de modelos de combustível de Scott & Burgan, 2005.

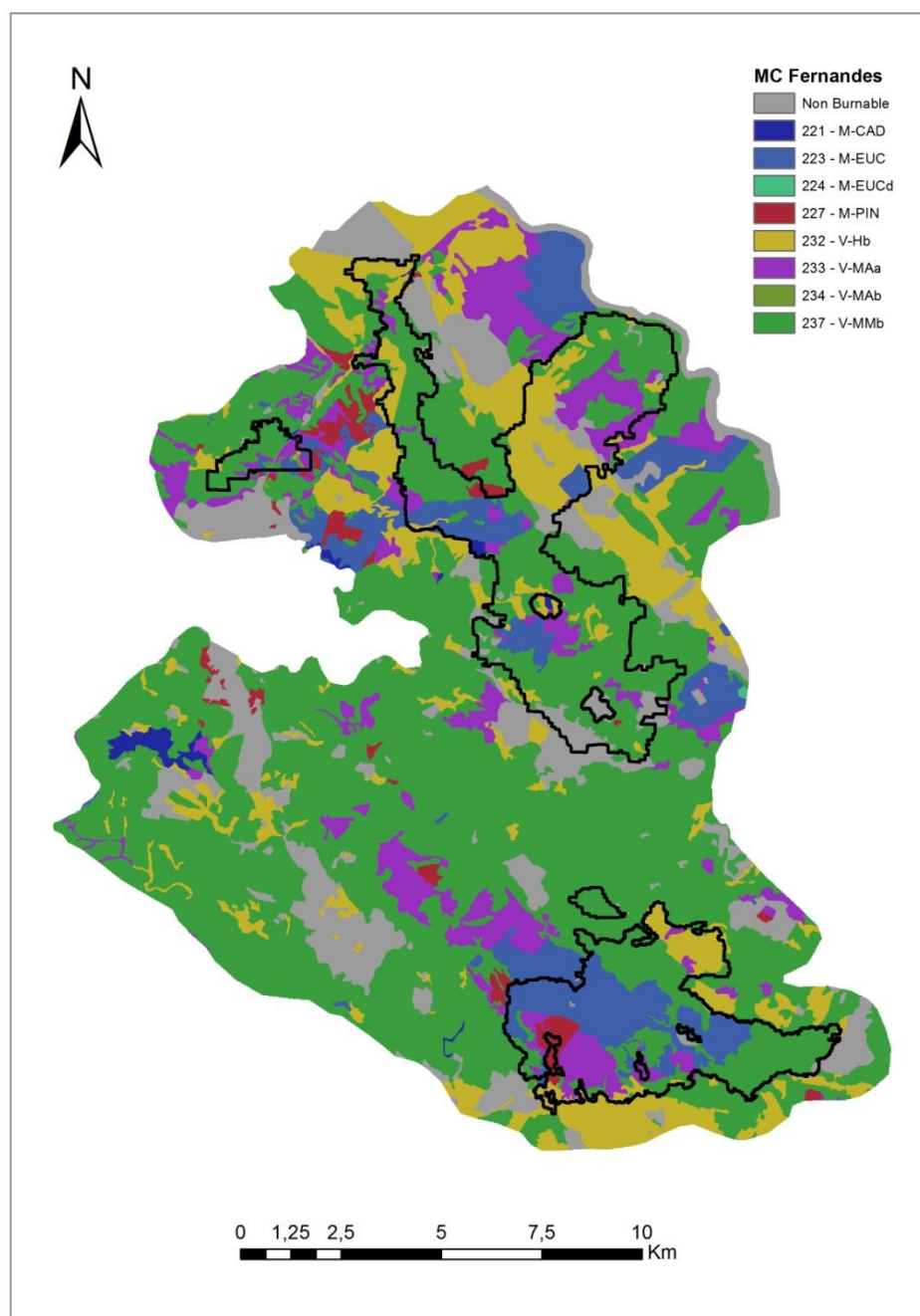


Figura 17 - Mapa de combustível para o cenário de modelos de combustível de Fernandes, et al., 2009.

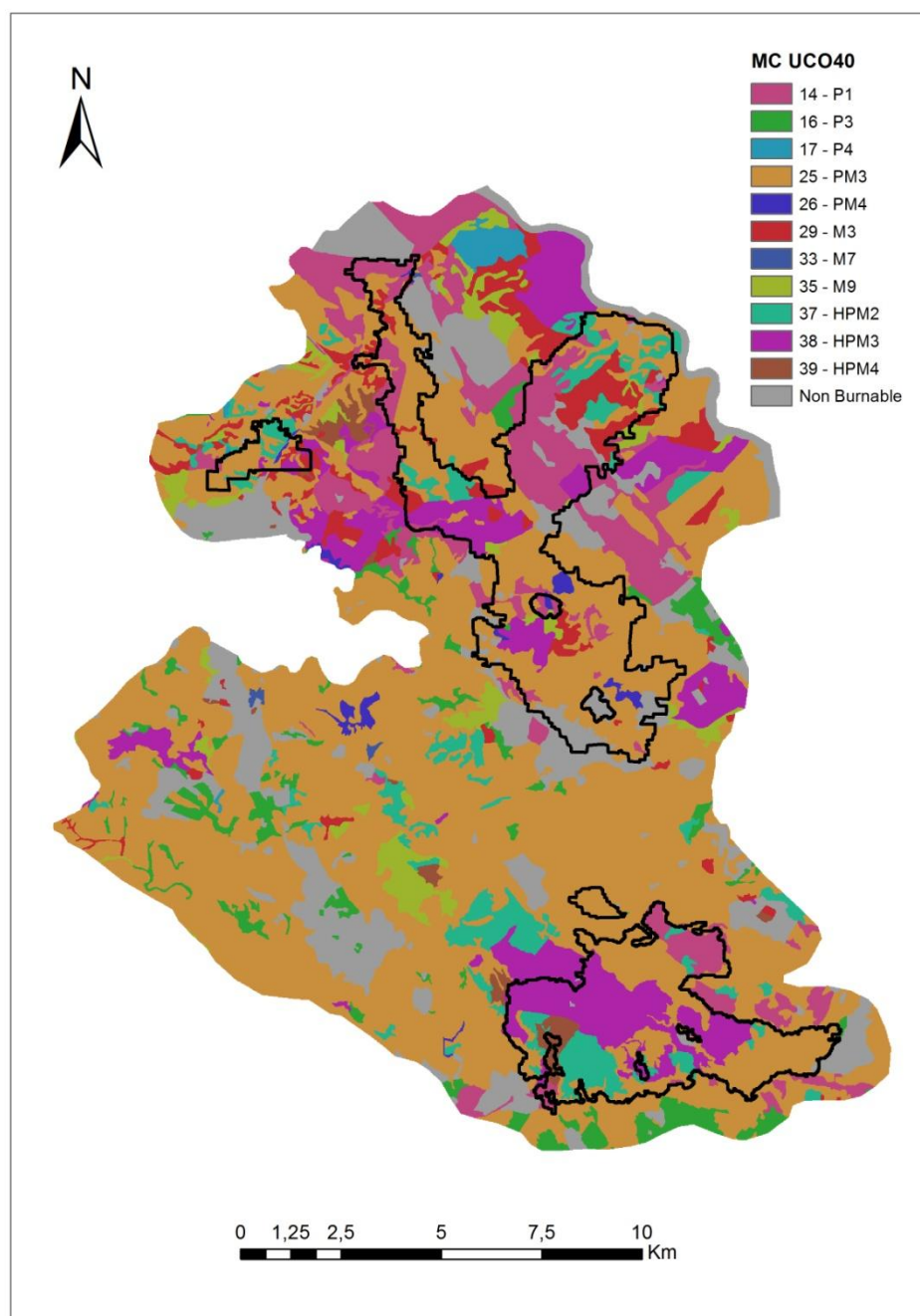


Figura 18 - Mapa de combustível para o cenário de modelos de combustível do sistema UCO₄₀ (Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011).

Os modelos de combustível predominantes em cada caso de estudo encontram-se resumidos na Tabela 6. Para além dos modelos de combustível descritos, foram ainda utilizados os modelos “nonburnable” NB₁ (91), NB₃ (93), NB₈ (98) e NB₉ (99) (Scott & Burgan, 2005), para

caracterizar as áreas urbanas e agrícolas (incluindo olivais, pomares e vinhas, excluindo culturas anuais de sequeiro), massas de água e solo nu, zonas onde os incêndios não progridem por falta de carga combustível.

Casos de Estudo	Modelos de Combustível (nº - Modelo)			
	Anderson	Scott & Burgan	Fernandes	UCO40
2001	5 - Fuel Model 5	146 - SH6	237 - V-MMb	25 - PM3
2003	1 - Fuel Model 1 4 - Fuel Model 4 5 - Fuel Model 5 6 - Fuel Model 6	101 - GR1 142 - SH2 146 - SH6 147 - SH7	223 - M-EUC 232 - V-Hb 233 - V-MAa 237 - V-MMb	14 - P1 25 - PM3 37 - HPM2 38 - HPM3
2004	1 - Fuel Model 1 4 - Fuel Model 4 5 - Fuel Model 5 6 - Fuel Model 6	101 - GR1 142 - SH2 146 - SH6 147 - SH7	223 - M-EUC 232 - V-Hb 233 - V-MAa 237 - V-MMb	14 - P1 25 - PM3 37 - HPM2 38 - HPM3
2005	4 - Fuel Model 4 5 - Fuel Model 5 6 - Fuel Model 6	142 - SH2 145 - SH5 146 - SH6 147 - SH7	223 - M-EUC 233 - V-MAa 237 - V-MMb	25 - PM3 29 - M3 37 - HPM2 38 - HPM3

Tabela 6 – Modelos de combustível predominantes nos casos de estudo.

Dada a escassez de dados relativos ao teor de humidade dos combustíveis, foram considerados os valores da Tabela 7 para todos os modelos de combustível. Teores de humidade baixos e muito baixos foram atribuídos aos combustíveis mortos e vivos, respetivamente (Scott & Burgan, 2005).

Fuel	Dead			Live	
	1-hr	10-hr	100-hr	Herbaceous	Woody
Fuel Moisture (%)	6	7	8	30	60

Tabela 7 – Valores de teor de humidade (Fuel Moisture) de todos os modelos de combustíveis.

O fator de ajustamento foi considerado 1.0 para todos os modelos de combustível.

Para além de todos os fatores apresentados, foi ainda determinado o tipo de modelação pretendido. Como tal, foi considerada a simulação de fogo de superfície, tendo em conta que os estratos herbáceos e arbustivos, incluindo resíduos provenientes do estrato arbóreo, constituem o meio de

propagação dos incêndios nos casos de estudo. Não foram considerados os modelos de simulação de fogo de copas ou saltos de fogo.

No total foram efetuadas 32 simulações, 8 para cada caso de estudo, fazendo variar os dados de entrada da topografia (TIN e *Topo to Raster*) e os 4 conjuntos de modelos de combustível, como se pode verificar no exemplo da Tabela 8.

Caso de estudo 2001							
Topografia TIN				Topografia <i>Topo to Raster</i>			
MC Anderson	MC Scott & Burgan	MC Fernandes	MC UCO40	MC Anderson	MC Scott & Burgan	MC Fernandes	MC UCO40
2001-S1	2001-S2	2001-S3	2001-S4	2001-S5	2001-S6	2001-S7	2001-S8

Tabela 8 – Simulações efetuadas para o caso de estudo de 2001.

De cada simulação resultaram os 8 *outputs* referidos anteriormente, em formato *raster* com resolução de 15 m, assim como o perímetro de incêndio.

2.3 Análise Estatística

Por forma a comparar as simulações de incêndio com os incêndios reais, foi considerada uma análise estatística através do coeficiente Kappa (K) de Cohen (Congalton, 1991) utilizando os perímetros de incêndio simulados e reais.

Os perímetros de todas as simulações e os perímetros reais foram convertidos do formato *shapefile* para formato *raster* e classificados pelos valores “2” e “1” respetivamente. A conversão englobou também um retângulo envolvente dos perímetros, considerada como a área não ardida, classificada com o valor “0”. Com recurso à álgebra de mapas e através da expressão, “perímetro real” + “perímetro simulado”, foram gerados mapas com a intersecção das áreas ardidas e não ardidas, simuladas e reais. Pela expressão anterior, 4 resultados são possíveis:

- 0 – área não ardida, tanto simulada como real.
- 1 – área ardida real, não ardida simulada.
- 2 – área ardida simulada, não ardida real.
- 3 – área ardida, tanto simulada como real.

A quantificação destes resultados é feita pelo número de células que contêm os respetivos valores. Para além dos mapas, resultam também as matrizes de erro (Anexo I) relativas à classificação (Figura 19).

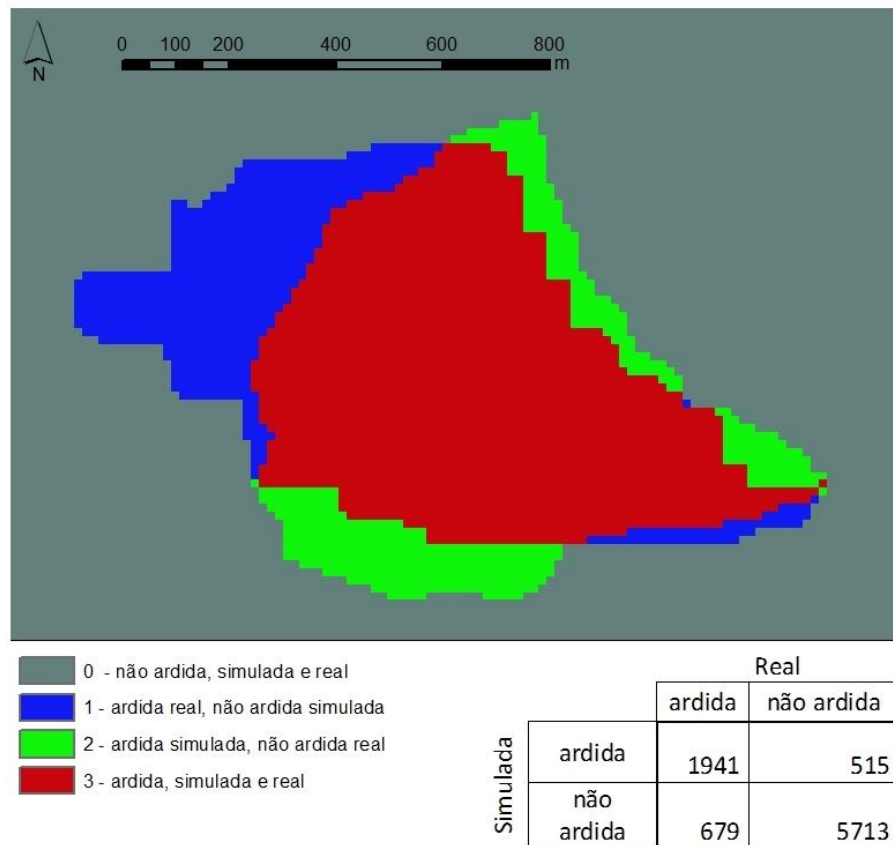


Figura 19 – Exemplo de mapa e matriz de erro, de áreas ardidas e não ardidas, reais e simuladas.

O coeficiente Kappa (K) de Cohen é uma técnica multivariada discreta aplicada na avaliação da precisão de uma classificação. O seu cálculo, para além de considerar a concordância geral entre dois conjuntos de categorizações, toma também em consideração a concordância derivada da sorte (Congalton, 1991). Os valores de K foram calculados a partir das matrizes de erro (Anexo I) de acordo com a seguinte expressão:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}$$

N – número total de observações

r – número de linhas na matriz de erro

x_{ii} – número de observações da linha i e coluna i

x_{i+} - total marginal da linha i

x_{+i} - total marginal da coluna i

Equação 3 – Coeficiente Kappa (K) de Cohen.

Os valores de K podem variar de -1 a 1, onde valores negativos indicam total discordância entre observações. O valor “0” indica acordo entre observações totalmente devido à sorte e o valor 1 indica total concordância entre observações. De forma a analisar valores de K, podem ser consideradas as seguintes classes: 0 a 0.4, concordância fraca; 0.4 a 0.75, concordância de média a boa; superior a 0.75, concordância excelente (Fleiss, et al., 2003).

Visto que K é normalmente distribuído foi utilizado o teste de significância Z na determinação da precisão da classificação e na significância de diferenças entre valores de K. Os valores de Z foram calculados da seguinte forma:

$$Z = \frac{K_1}{\sqrt{Var(K_1)}}$$

K_1 – valor de K da simulação

$Var(K_1)$ – variância do valor de K

Equação 4 – Significância (Z) do coeficiente K de Cohen.

Por sua vez a variância de K é calculada pela seguinte expressão:

$$Var(K) = \frac{1}{N(1-p_c)^4} \left\{ \sum_{i=1}^m p_{ii} [(1-p_c)(p_{i+} + p_{+i})(1-p_o)]^2 + (1-p_o)^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m p_{ij} (p_{i+} + p_{+j})^2 - (p_o p_c - 2p_c + p_o)^2 \right\}$$

$Var(K)$ – variância de K

N – número total de observações

m – número de categorias

p_c – proporção de observações de concordância devido à sorte

p_o – proporção de observações corretamente classificadas

Equação 5 – Variância do coeficiente K de Cohen, $Var(K)$.

A significância de Z é avaliada pelo valor P associado.

Ao aplicar as hipóteses temos:

H_0 : $K_1 = 0$, não melhor do que classificação aleatória

H_1 : $K_1 \neq 0$, melhor do que classificação aleatória

A hipótese nula é rejeitada se $Z \geq Z_p$, sendo Z_p produzido pelo teste Z de duas caudas, onde $p = \alpha/2$, com α como o nível de significância.

Por sua vez a comparação de dois valores de K implicou o cálculo de valores de Z consoante a seguinte expressão:

$$Z = \frac{(K_1 - K_2)}{\sqrt{[Var(K_1) + Var(K_2)]}}$$

Equação 6 - Significância (Z) da diferença entre coeficientes K de Cohen.

Ao aplicar as hipóteses temos:

H_0 : $K_1 - K_2 = 0$, valores de K não significativamente diferentes

H_1 : $K_1 - K_2 \neq 0$, valores de K significativamente diferentes

Mais uma vez a hipótese nula é rejeitada se $Z \geq Z_p$.

Para além da análise estatística foi também feita uma análise visual, que embora seja subjetiva, é apoiada por Finney (2000) na comparação de perímetros de incêndio reais e simulados.

3 RESULTADOS

Apresentam-se seguidamente os resultados obtidos pelas simulações para cada caso de estudo.

2001 - Monte Novo

O caso de estudo de 2001 refere-se a um incêndio de pequenas dimensões (60 ha) e curta duração (12 horas). A zona ardida apresentava vegetação arbustiva com características aparentemente constantes pelo espaço, logo foi classificada com apenas 1 modelo de combustível considerando cada sistema de modelos de combustível (Tabela 6).

As figuras seguintes (Figura 20; Figura 21) representam os perímetros de incêndio para cada simulação efetuada, diferenciando o método de génese das condições topográficas e os sistemas de modelos de combustível.

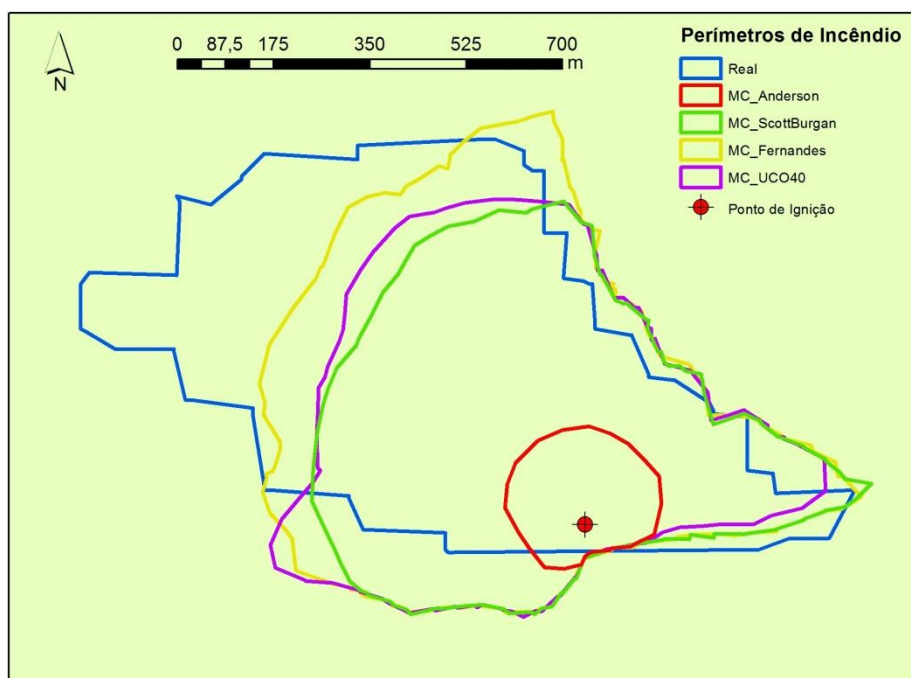


Figura 20 – Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2001, com condições topográficas geradas pelo algoritmo TIN.

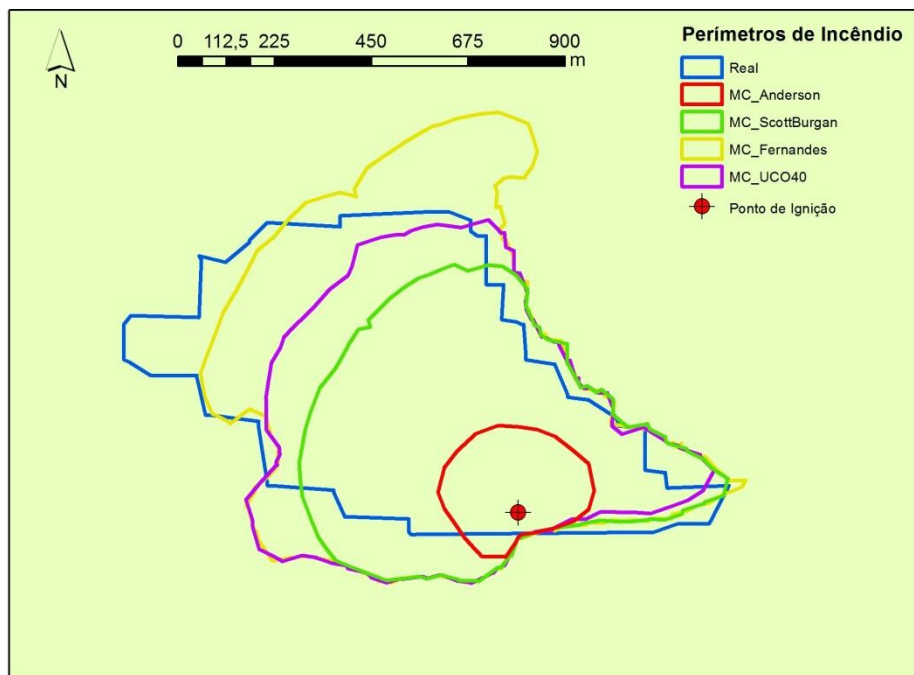


Figura 21 - Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2001, com condições topográficas geradas pelo algoritmo *Topo to Raster*.

Pela análise visual, os modelos de combustível definidos por Fernandes, et al. (2009) e Anderson, et al. (1982), parecem ser os que apresentam, respectivamente, melhores e piores resultados em ambos os cenários topográficos.

Da análise estatística resultou a Tabela 9.

	K ₁	K ₂	Comp. K's
MC	TIN	<i>Topo to Raster</i>	
Anderson	0,117**aa	0,154**aa	NS*
Scott & Burgan	0,566**b	0,574**bb	NS*
Fernandes	0,670**cc	0,711**cc	S**
UCO40	0,573**b	0,655**dd	S**

*p≤0,05; **p≤0,01

S - Significativo; NS - Não Significativo (comparação de K₁ e K₂, teste Z, considerando os mesmos modelos de combustível)

Letras iguais indicam valores de K não significativamente diferentes para p≤0,05 (1 letra) e p≤0,01 (2 letras) (comparação de modelos de combustível, teste Z, para K₁ e K₂ individualmente)

Tabela 9 – Resumo da avaliação estatística das simulações relativas ao caso de estudo 2001.

Embora todas as simulações apresentem resultados de classificação melhor que o aleatório para $p \leq 0,01$, ambas as simulações respeitantes aos modelos de combustível de Anderson, et al., (1982) exibem fraca concordância, para além de não serem significativamente diferentes entre elas, para $p \leq 0,05$. As restantes simulações apresentam concordância média/boa, sendo que as simulações de modelos de combustível Scott & Burgan (2005) e UCO40 (Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011) com o cenário topográfico TIN não são significativamente diferentes para $p \leq 0,05$. As simulações com os modelos de combustível de Fernandes, et al. (2009) e UCO40 (Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011) apresentam diferenças significativas entre cenários topográficos para $p \leq 0,01$, com o melhor valor de concordância, $K=0,711$, a pertencer à simulação de modelos de combustível de Fernandes, et al. (2009) e condições topográficas geradas pelo algoritmo *Topo to Raster*.

Da simulação acima referida, resultou uma Taxa de Propagação ao longo do espaço, representada na Figura 22.

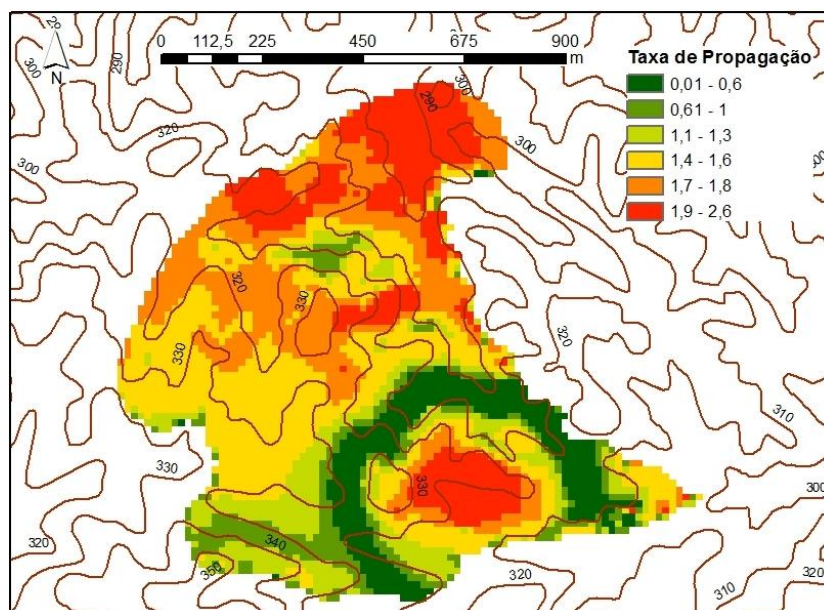


Figura 22 – Taxa de propagação (m min^{-1}) da simulação de 2001 com modelos de combustível de **Fernandes, et al. (2009)** e cenário topográfico *Topo to Raster*.

É possível verificar o efeito do declive na taxa de propagação. Fica a ideia geral que o fogo aumentou a sua taxa de propagação quando se desloca de um ponto para outro mais elevado. Poderá ser esta a razão das diferenças entre simulações dos dois cenários topográficos uma vez que o algoritmo *Topo to Raster* gerou declives ligeiramente superiores que o algoritmo TIN, para a zona em questão.

2003 - Milha

O verão de 2003 foi um período propício para ocorrência de grandes incêndios florestais devido às condições climáticas extremas que se fizeram sentir. O incêndio do caso de estudo de 2003 comprova isso, dadas as suas dimensões (3800 ha) e duração (107 horas). A zona ardida apresentava forte presença de vegetação arbustiva, isolada ou como sub-coberto de sobreiros, azinheiras e eucaliptos, pelo que vários modelos de combustível foram considerados na sua caracterização (Tabela 6).

As figuras seguintes (Figura 23; Figura 24) representam os perímetros de incêndio para cada simulação efetuada, diferenciando o método de génese das condições topográficas e os sistemas de modelos de combustível.

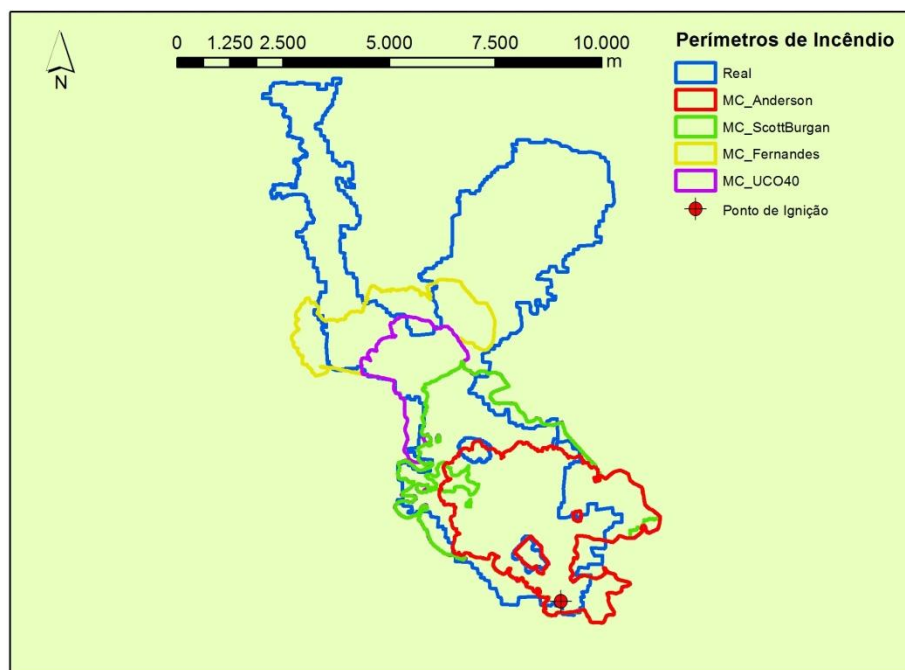


Figura 23 - Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2003, com condições topográficas geradas pelo algoritmo TIN.

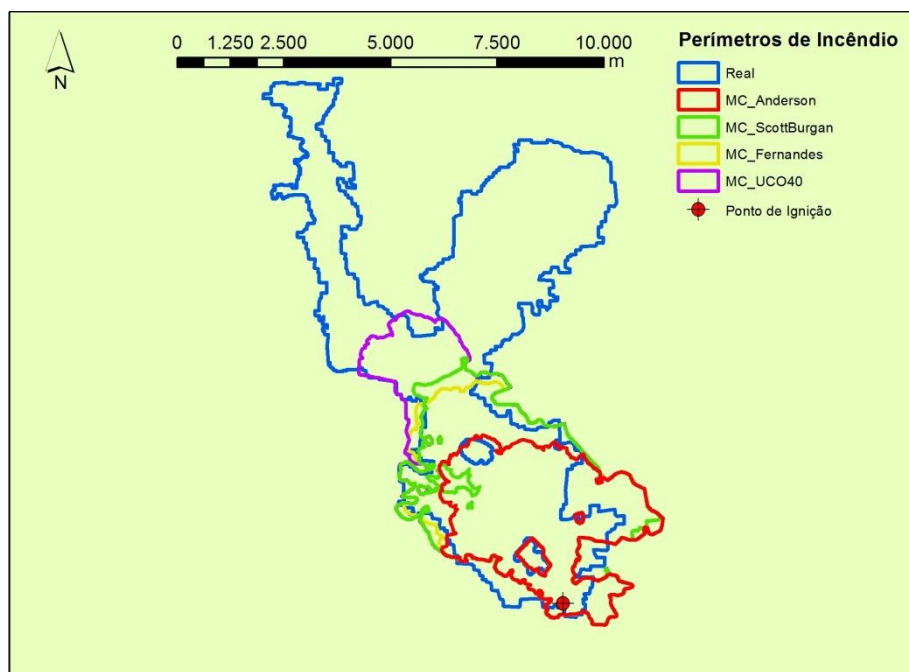


Figura 24 - Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2003, com condições topográficas geradas pelo algoritmo *Topo to Raster*.

Por análise visual é possível constatar que nenhuma das simulações conseguiu resultados satisfatórios, sendo que todas subestimaram a zona ardida. Tal facto poderá dever-se a uma atribuição desadequada de modelos de combustível, e a dados meteorológicos pouco precisos, considerando a extensão do incêndio e a heterogeneidade das condições do terreno. Ainda assim, fica a ideia que os modelos de combustível de Fernandes, et al. (2009) e UCO40 (Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011) estarão mais aderentes à realidade das características dos combustíveis da zona.

Da análise estatística resultou a Tabela 10.

	K ₁	K ₂	Comp. K's
MC	TIN	<i>Topo to Raster</i>	
Anderson	0,256**aa	0,267**aa	S**
Scott & Burgan	0,362**bb	0,370**b	S**
Fernandes	0,492**cc	0,367**b	S**
UCO40	0,440**dd	0,444**cc	NS*

*p≤0,05; **p≤0,01

S - Significativo; NS - Não Significativo (comparação de K₁ e K₂ considerando os mesmos modelos de combustível)

Letras iguais indicam valores de K não significativamente diferentes para p≤0,05 (1 letra) e p≤0,01 (2 letras) (comparação de modelos de combustível para K₁ e K₂ individualmente)

Tabela 10 - Resumo da avaliação estatística das simulações relativas ao caso de estudo 2003.

É possível verificar que as simulações com os modelos de combustível de Anderson, et al. (1982) apresentam a concordância mais fraca com K's de 0,256 e 0,267, embora todas as simulações apresentem resultados de classificação melhor que o aleatório para p≤0,01. Os melhores resultados foram obtidos pelos modelos de combustível de Fernandes, et al. (2009) com as condições topográficas TIN, apresentando um valor de K de 0,492. Embora significativamente diferentes da simulação anteriormente referida para p≤0,01, ambas as simulações com os modelos de combustível UCO40 (Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011) apresentam resultados de concordância próximos desta, com valores de K de 0,44 e 0,444, sendo que não são significativamente diferentes entre elas para p≤0,05.

A Figura 25 apresenta a Taxa de Propagação da simulação com os modelos de combustível de Fernandes, et al. (2009) e cenário topográfico TIN, ao longo do espaço.

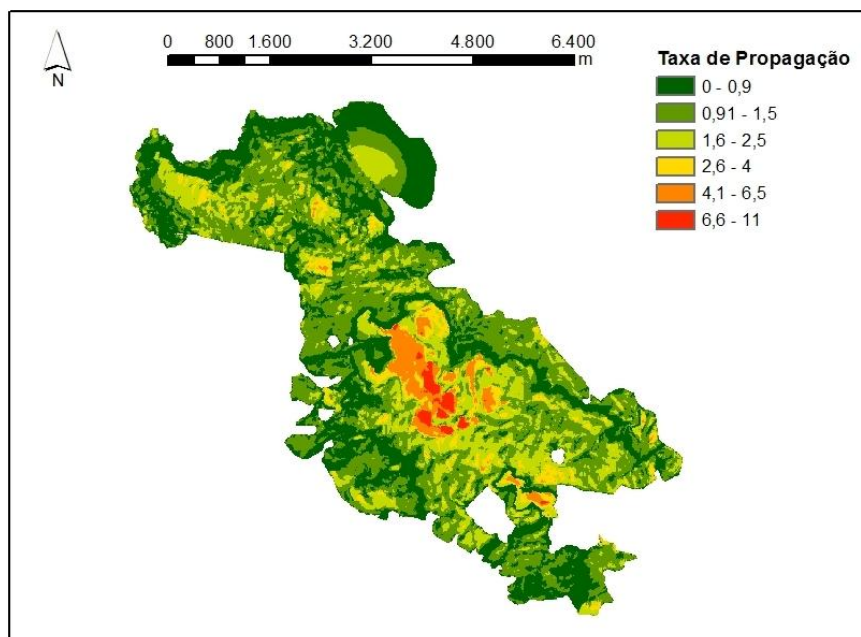


Figura 25 - Taxa de propagação (m min^{-1}) da simulação de 2003 com modelos de combustível de **Fernandes, et al. (2009)** e cenário topográfico TIN.

Dados os resultados estatísticos da simulação, fica a ideia que a taxa de propagação deveria, em média, ser mais elevada com vista a uma maior concordância da área ardida.

2004 - Monte Santos

O caso de estudo de 2004 diz respeito a um incêndio de dimensões consideráveis (2100 ha) e longa duração (83 horas). A zona ardida apresentava forte presença de vegetação arbustiva, isolada ou como subcoberto de sobreiros, azinheiras, eucaliptos e pinheiros mansos, pelo que vários modelos de combustível foram considerados na sua caracterização (Tabela 6).

As figuras seguintes (Figura 26; Figura 27) representam os perímetros de incêndio para cada simulação efetuada, diferenciando o método de génese das condições topográficas e os sistemas de modelos de combustível.

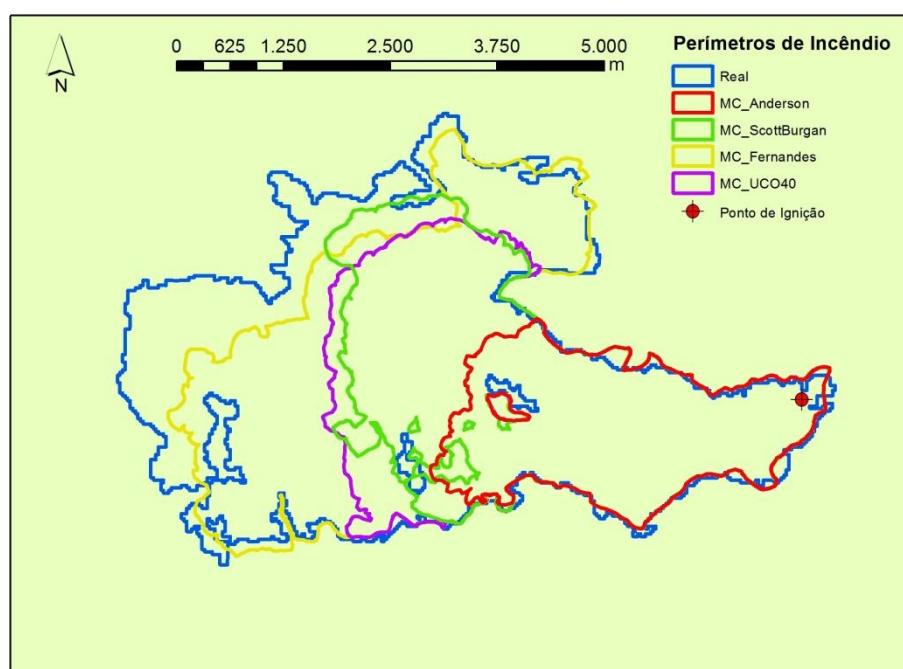


Figura 26 - Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2004, com condições topográficas geradas pelo algoritmo TIN.

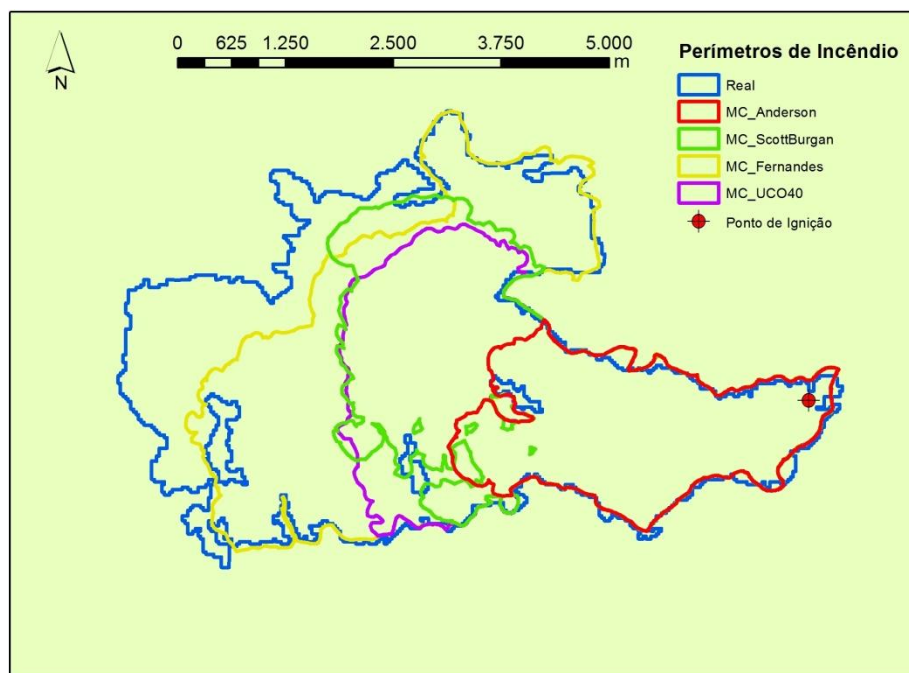


Figura 27 - Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2004, com condições topográficas geradas pelo algoritmo *Topo to Raster*.

Mais uma vez, pela análise visual, é possível verificar que os modelos de combustível definidos por Fernandes, et al. (2009) e Anderson (1982), parecem ser os que apresentam, respetivamente, melhores e piores resultados em ambos os cenários topográficos.

Da análise estatística resultou a Tabela 11.

MC	K ₁	K ₂	Comp. K's
	TIN	<i>Topo to Raster</i>	
Anderson	0,314**aa	0,293**aa	S**
Scott & Burgan	0,542**bb	0,551**bb	S**
Fernandes	0,794**cc	0,783**cc	S**
UCO40	0,571**dd	0,540**dd	S**

*p≤0,05; **p≤0,01

S - Significativo; NS - Não Significativo (comparação de K₁ e K₂ considerando os mesmos modelos de combustível)

Letras iguais indicam valores de K não significativamente diferentes para p≤0,05 (1 letra) e p≤0,01 (2 letras) (comparação de modelos de combustível para K₁ e K₂ individualmente)

Tabela 11 - Resumo da avaliação estatística das simulações relativas ao caso de estudo 2004.

Os resultados estatísticos permitem afirmar que todas as simulações apresentam melhor classificação do que o aleatório para $p \leq 0,01$ e que todas são, entre elas, significativamente diferentes para $p \leq 0,01$. As simulações com os modelos de combustível de Anderson (1982) apresentam os piores valores de concordância com K's de 0,314 e 0,293. Por sua vez as simulações com os modelos de combustível de Fernandes, et al. (2009) apresentam as melhores concordâncias, consideradas excelentes, com K's de 0,783 (*Topo to Raster*) e 0,794 (TIN).

A Figura 28 apresenta a Taxa de Propagação da simulação com os modelos de combustível de Fernandes, et al. (2009) e cenário topográfico TIN, ao longo do espaço.

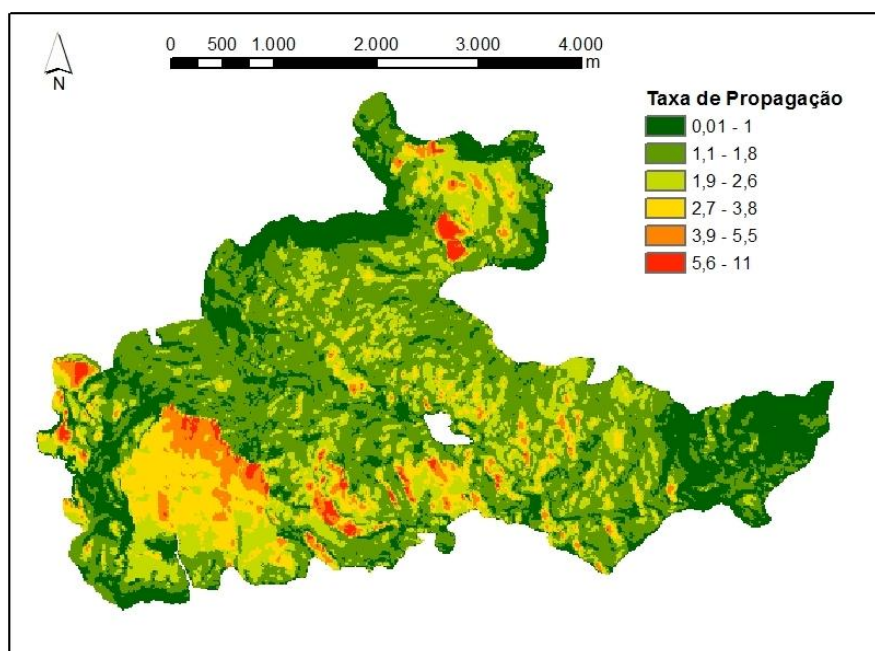


Figura 28- Taxa de propagação (m min⁻¹) da simulação com modelos de combustível de **Fernandes, et al. (2009)** e cenário topográfico TIN.

Os locais onde a taxa de propagação é mais elevada são respeitantes a matos sem coberto arbóreo e a pastagens.

2005 - São Pedro

O caso de estudo de 2005 diz respeito a um incêndio de dimensões ligeiras (210 ha) e média duração (34 horas). A zona ardida era maioritariamente composta por matos com a presença de pequenas manchas pontuais de sobreiros ou eucaliptos. Os modelos de combustível considerados na sua caracterização estão expostos na Tabela 6.

As figuras seguintes (Figura 29; Figura 30) representam os perímetros de incêndio para cada simulação efetuada, diferenciando o método de génese das condições topográficas e os sistemas de modelos de combustível.

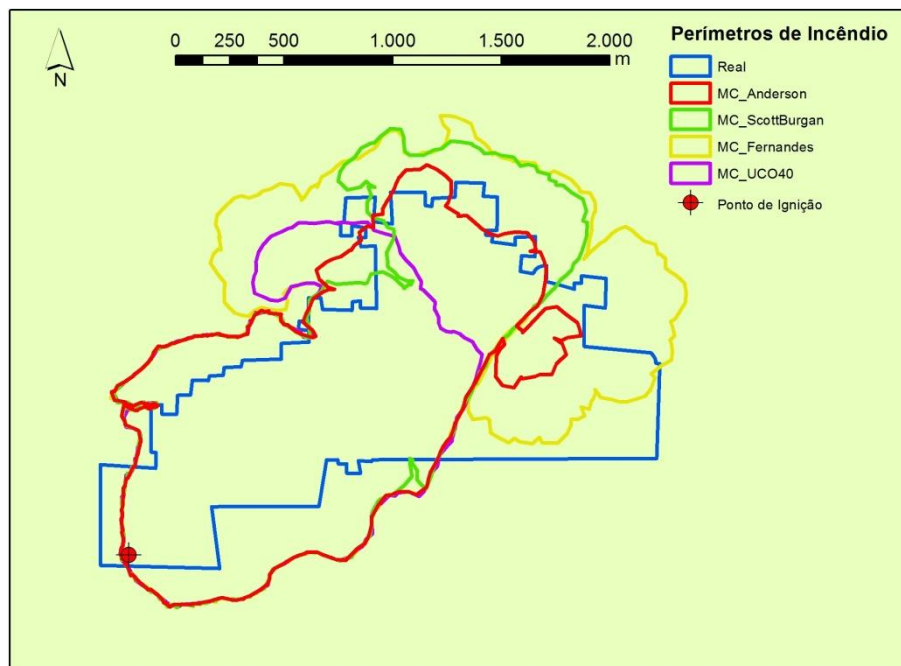


Figura 29 - Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2005, com condições topográficas geradas pelo algoritmo TIN.

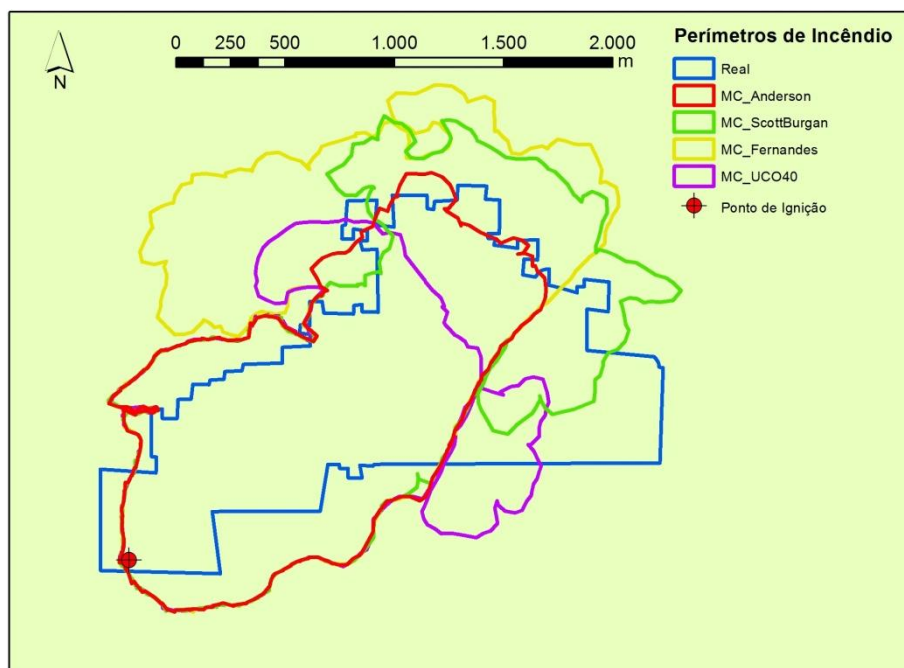


Figura 30 - Perímetros de incêndio das simulações do caso de estudo 2005, com condições topográficas geradas pelo algoritmo *Topo to Raster*.

Recorrendo a análise visual, não fica claro em nenhum dos cenários topográficos, quais as simulações que aparentam oferecer melhores resultados, uma vez que existe evidente subestimação de área ardida para os cenários com modelos de combustível de Anderson (1982) e UCO₄₀ (Rodríguez y Silva & Molina-Martínez, 2011) e sobrestimação para os de Fernandes, et al. (2009) e Scott & Burgan (2005).

Da análise estatística resultou a Tabela 12.

	K ₁	K ₂	Comp. K's
MC	TIN	<i>Topo to Raster</i>	
Anderson	0,632**aa	0,597**a	S**
Scott & Burgan	0,558**b	0,607**a	S**
Fernandes	0,574**b	0,405**bb	S**
UCO40	0,466**cc	0,490**cc	S**

*p≤0,05; **p≤0,01

S - Significativo; NS - Não Significativo (comparação de K₁ e K₂ considerando os mesmos modelos de combustível)

Letras iguais indicam valores de K não significativamente diferentes para p≤0,05 (1 letra) e p≤0,01 (2 letras) (comparação de modelos de combustível para K₁ e K₂ individualmente)

Tabela 12 - Resumo da avaliação estatística das simulações relativas ao caso de estudo 2005.

Todas as simulações apresentam melhor classificação do que o aleatório para $p \leq 0,01$. Estatisticamente a simulação que apresentou melhor concordância foi a do cenário topográfico TIN com os modelos de combustível de Anderson (1982) com um K de 0,632. No entanto, considerando também a análise visual e os resultados dos outros casos de estudo, não parece ser possível aferir que modelos de combustível e cenários topográficos melhor representam o local do caso de estudo. De referir ainda que o local do presente caso é o que apresenta maior irregularidade de terreno com encostas declivosas e vales encaixados. Tal facto pode ter influência no padrão dos ventos, logo, esta condicionante, pode não ter sido bem caracterizada.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo visou a comparação de modelos de combustível na simulação de comportamento de fogo em zonas florestais no Alentejo central.

Para tal foi escolhido um sistema de simulação com componente SIG, FARSITE, para efetuar as simulações de comportamento de fogo e considerados vários conjuntos de modelos de combustível para caracterizar os complexos vegetais do território. Os modelos de combustível foram atribuídos com base na Cartografia de Ocupação do Solo (COS90) e no conhecimento empírico em conjunto com dados fitossociológicos das comunidades vegetais da região. Tal subjetividade alberga naturalmente um certo grau de erro na caracterização dos combustíveis. Para além disso é necessário reter que os modelos de combustível utilizados foram originalmente propostos para caracterizar zonas que não a constituinte dos casos de estudo especificamente. A par dos dados relativos aos combustíveis vegetais, outros dados (condições meteorológicas, topografia) inseridos no simulador estão sujeitos a erro devido a vários fatores como, entre outros, a escala de trabalho, resolução espacial e temporal, método e precisão da recolha.

Para além das limitações relativas aos dados é necessário ter em conta as limitações do próprio simulador, nomeadamente na técnica de propagação e nos modelos matemáticos de previsão de comportamento do fogo que nele estão inseridos.

Ainda que com algumas limitações, FARSITE apresenta-se como uma boa ferramenta na simulação de comportamento de fogo. Os dados gerados pelo simulador podem ser aplicados na análise dos combustíveis presentes no território com vista à prevenção e combate a incêndios.

Os resultados obtidos nas simulações foram gerados fazendo variar as condições topográficas e os modelos de combustível.

Embora não seja conclusivo, as condições topográficas geradas pelo algoritmo TIN parecem, no geral, estar mais aderentes à realidade.

Relativamente aos modelos de combustível, os dados parecem apontar para os modelos desenvolvidos por Fernandes, et al. (2009) como os mais adequados na caracterização da vegetação na área de estudo, embora com algumas reservas referentes à sua influência em conjunto com os outros fatores, no comportamento de fogo. De acordo com os resultados obtidos é possível afirmar que os modelos de combustível desenvolvidos por Fernandes, et al. (2009) podem ser considerados na caracterização da vegetação da Serra de Portel e em planos de prevenção e combate a incêndios florestais.

No futuro seria interessante conseguirem-se dados climáticos e topográficos mais precisos e voltar a efetuar as simulações, considerando os mesmos mapas de combustível, de modo a avaliar a influência destes fatores no comportamento de fogo nos casos de estudo. Seria também de extrema utilidade o desenvolvimento de modelos de combustível que caracterizem as especificidades das comunidades de vegetação locais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFN, 2011a. *Monitorização e avaliação do Plano Nacional de Defesa da Floresta Contra Incêndio 2009/2010, Relatório final*, Lisboa: Autoridade Florestal Nacional.

AFN, 2011b. *Relatório anual de áreas ardidas e ocorrências 2010*, Lisboa: Autoridade Florestal Nacional.

ALBINI, F., 1979. *Spot fire distance from burning trees: a predictive model*, USDA Forest Service, Ogden, Utah: Gen. Tech. Rep. INT-56.

ALBINI, F. & BAUGHMAN, R., 1979. *Estimating windspeeds for predicting wildland fire behavior*, USDA Forest Service, Ogden, Utah: Research Paper INT-221.

ALBRIGHT, D. & MEISNER, B., 1999. Classification of fire simulation systems. *Fire Management Notes*, 59(2), pp. 5-12.

ALEXANDRIDIS, A., VAKALIS, D., SIETTOS, C. & BAFAS, G., 2008. A cellular automata model for forest fire spread prediction: the case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990. *Applied Mathematics and Computation*, Volume 204, pp. 191-201.

ANDERSON, D., CATCHPOLE, E., DEMESTRE, N. & PARKES, T., 1982. Modelling the spread of grass fires. *Journal of the Australian Mathematical Society*, 23(Series B), pp. 451-466.

ANDERSON, H., 1982. *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior*, USDA Forest Service, Ogden, Utah: Report INT-122.

ANDREWS, P., 1986. *BEHAVE: fire behaviour prediction and fuel modeling system - BURN subsystem, part 1*, USDA Forest Service, Ogden, Utah: Gen. Tech. Rep. INT-194.

ARCA, B. et al., 2007. Evaluation of FARSITE simulator in Mediterranean maquis. *International Journal of Wildland Fire*, 16(5), pp. 563-572.

BELIZ, J., 1990. *A Serra de Portel - Flora e Vegetação*. Lisboa: Serviço Nacional de Parques, Reservas e Conservação da Natureza.

BERJAK, S. & HEARNE, J., 2002. An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system. *Ecological Modelling*, Volume 148, pp. 133-151.

BOND, W. & KEELEY, J., 2005. Fire as global "herbivore": the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, Volume 20, pp. 387-394.

BRADSHAW, L., DEEMING, J., BURGAN, R. & COHEN, J., 1983. *The 1978 national fire danger rating system: technical documentation*, USDA Forest Service, Ogden, Utah: Gen. Tech. Rep. INT-169.

BURGAN, R. & ROTHERMEL, R., 1984. *BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system - Fuel subsystem*, USDA Forest Service, Ogden, Utah: Gen. Tech. Rep. INT-167.

BUTLER, B., ANDERSON, W. & CATCHPOLE, E., 2007. *Influence of slope on fire spread rate*, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research, Fort Collins, Colorado: Proceedings RMRS-P-46CD.

CALL, P. & ALBINI, F., 1997. Aerial and surface fuel consumption in crown fires. *International Journal of Wildland Fire*, 7(3), pp. 259-264.

CHUVIESCO, E. & MARTIN, M., 1994. Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing of the Environment*, Volume 29, pp. 147-159.

CONGALTON, R., 1991. A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, Volume 37, pp. 35-46.

COSTA, J. et al., 1998. Biogeografia de Portugal Continental. *Quercetia*, Volume 0.

COUNTRYMAN, C., 1972. *The fire environment concept*, USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, California: Technical Paper.

CRUZ, M., 2005. *Guia fotográfico para identificação de combustíveis florestais - região Centro de Portugal*, Coimbra: CEIF, ADAI.

CRUZ, M. & FERNANDES, P., 2008. Development of fuel models for fire behaviour prediction in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stands. *International Journal of Wildland Fire*, Volume 17, pp. 194-204.

DE LUÍS, M., BAEZA, M., RAVENTÓS, J. & GONZÁLES-HIDALGO, J., 2004. Fuel characteristics and fire behaviour in mature mediterranean gorse shrublands. *International Journal of Wildland Fire*, Volume 13, pp. 79-87.

DEBANO, L., NEARY, D. & FOLLIOTT, P., 1998. *Fire's effects on ecosystems*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

DIMITRAKOPOULOS, A., 2002. Mediterranean fuel models and potential fire behaviour in Greece. *International Journal of Wildland Fire*, Volume 11, pp. 127-130.

ESRI, 2012. *ArcGIS Resource Center*. [Online] Available at: http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/How_Topo_to_Raster_works/009z0000007m000000/ [Acedido em 21 9 2013].

FEIO, M. & MARTINS, A., 1993. O relevo do alto Alentejo. *Finisterra*, Volume XXVIII, pp. 55-56.

FERNANDES, P., 2009. Combining forest structure data and fuel modelling to classify fire hazard in Portugal. *Annals of Forest Science*, 66(4), pp. 415P1-415P9.

FERNANDES, P. et al., 2009. *Modelos de Combustível Florestal para Portugal*. In: Actas do 6º Congresso Florestal Nacional. SPCF, Lisboa, pp. 348-354.

FINNEY, M., 1994. *Modelling the spread and behaviour of prescribed natural fires*. In: Proceedings of the 12th Conference on Fire and Forest Meteorology, pp. 138-143.

FINNEY, M., 2000. *Efforts at comparing simulated and observed fire growth patterns*, Systems for Environmental Management, Missoula, Montana: Final Report INT-95066-RJVA.

FINNEY, M., 2001. Design of regular landscape fuel treatment patterns for modifying fire growth and behaviour. *Forest Science*, Volume 47, pp. 219-228.

FINNEY, M., 2004. *FARSITE: Fire Area Simulator – Model development and evaluation*, USDA Forest Service, Ogden, Utah: Research Paper RMRS-RP-4 Revised.

FLEISS, J., LEVIN, B. & CHO PAIK, M., 2003. *Statistical methods for rates and proportions*. 3ª ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.

FORTHOFER, J., SHANNON, K. & BUTLER, B., 2009. *Simulating diurnally driven slope winds with WindNinja*. In: Proceedings of 8th Symposium on Fire and Forest Meteorological Society, Kalispell, Montana.

GÓMEZ-VÁSQUEZ, I. et al., 2013. Using density management diagrams to assess crown fire potencial in *Pinus pinaster* Ait. stands. *Annals of Forest Science*, Volume 71, pp. 473-484.

ICNF, 2010. *Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas*. [Online]
Available at: <http://www.icnf.pt/portal/florestas/dfci/inc/estat-sgif>
[Acedido em 16 9 2013].

ICNF, 2013. *IFN6 - Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental. Resultados preliminares, vl.1*, Lisboa: Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas.

KARAFYLLIDIS, I. & THANAILAKIS, A., 1997. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling*, Volume 99, pp. 87-97.

LOPES, A., CRUZ, M. & VIEGAS, D., 2002. FireStation - an integrated software system for the numerical simulation of fire spread on complex topography. *Environmental Modelling & Software*, Volume 17, pp. 269-285.

NEARY, D., RYAN, K. & DEBANO, L., 2005. *Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water*, USDA Forest Service, Ogden, Utah: Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol.4.

PAIXÃO, L., 2008. *Estudo da Flora e Vegetação das Áreas Ardidas do Concelho de Portel - Dinâmica Pós-Fogo*. Évora: Trabalho de fim de curso apresentado como requisito parcial na obtenção do grau de licenciado em Eng. Biofísica, Universidade de Évora.

PASTOR, E., ZARATE, L., PLANAS, E. & ARNALDOS, J., 2003. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 29, pp. 139-153.

PEREIRA, M. et al., 2005. Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(1-2), pp. 11-25.

PYNE, S., ANDREWS, P. & LAVEN, A., 1996. *Introduction to Wildfire*. 2^a ed. New York: John Wiley and Sons Edition.

RICHARDS, G., 1995. A general mathematical framework for modeling two-dimensional wildland fire spread. *International Journal of Wildland Fire*, 5(2), pp. 63-72.

RODRÍGUEZ Y SILVA, F. & MOLINA-MARTÍNEZ, J., 2011. Modeling Mediterranean forest fuels by integrating field data and mapping tools. *European Journal of Forest Research*, 131(3), p. 571-582.

ROTHERMEL, R., 1972. *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*, USDA Forest Service, Ogden, Utah: Research Paper INT-115.

ROTHERMEL, R., Wilson, R., Morris, G. & Sackett, S., 1986. *Modeling moisture content of fine dead wildland fuels input to the BEHAVE fire prediction system*, USDA Forest Service, Ogden, Utah: Research Paper INT-122.

SALIS, M., 2007. *Fire behavior simulation in Mediterranean maquis using FARSITE (Fire Area Simulator)*. Sassari, Italy: Ph.D. Thesis, Università degli studi di Sassari.

SCOTT, J. & BURGAN, R., 2005. *Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model*, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research, Fort Collins, Colorado: Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153.

SCOTT, J. & REINHARDT, E., 2001. *Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behaviour*, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research, Fort Collins, Colorado: Research Paper RMRS-RP-29.

SNIRH, s.d. *Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos*. [Online]
Available at: <http://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=>
[Acedido em 20 09 2013].

STRATTON, R., 2004. Assessing the effectiveness of landscape fuel treatments on fire growth and behavior. *Journal of Forestry*, 102(7), pp. 32-40.

TRIGO, R. et al., 2006. Atmospheric conditions associated with the exceptional fire season of 2003 in Portugal. *International Journal of Climatology*, 26(13), pp. 1741-1757.

VAN WAGNER, C., 1977. Conditions for the start and spread of crownfire. *Canadian Journal of Forest Research*, 7(1), pp. 23-34.

VAN WAGNER, C., 1993. Prediction of crown fire behavior in two stands of jack pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 23(3), pp. 442-449.

VELEZ, R., 2000. *La defensa contra incendios forestales*. Madrid: Ed. McGraw-Hill.

WHITE, R. & ZIPPERER, W., 2010. Testing and classification of individual plants for fire behavior: plant selection for the wildland-urban interface. *International Journal of Wildland Fire*, Volume 19, pp. 213-227.

ANEXOS

Anexo I - Matrizes de erro das simulações

M. C. Anderson

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	230	10	240
	não ardida	2390	6218	8608
	totais	2620	6228	8848

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	314	28	342
	não ardida	2306	6200	8506
	totais	2620	6228	8848

M. C. Scott & Burgan

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	1530	387	1917
	não ardida	1090	5841	6931
	totais	2620	6228	8848

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	1553	385	1938
	não ardida	1067	5843	6910
	totais	2620	6228	8848

M. C. Fernandes

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	1941	515	2456
	não ardida	679	5713	6392
	totais	2620	6228	8848

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	2364	882	3246
	não ardida	256	5346	5602
	totais	2620	6228	8848

M. C. UCO40

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	1589	442	2031
	não ardida	1031	5786	6817
	totais	2620	6228	8848

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	1898	524	2422
	não ardida	722	5704	6426
	totais	2620	6228	8848

TIN

Topo to raster

Conjunto de tabelas 1 – Matrizes de erro das simulações do cado de estudo 2001.

M. C. Anderson

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	39015	15396	54411
	não ardida	131646	489154	620800
	totais	170661	504550	675211

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	41082	16217	57299
	não ardida	129579	488333	617912
	totais	170661	504550	675211

M. C. Scott & Burgan

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	58891	22858	81749
	não ardida	111770	481692	593462
	totais	170661	504550	675211

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	59635	21738	81373
	não ardida	111026	482812	593838
	totais	170661	504550	675211

M. C. Fernandes

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	87662	34250	121912
	não ardida	82999	470300	553299
	totais	170661	504550	675211

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	59058	21784	80842
	não ardida	111603	482766	594369
	totais	170661	504550	675211

M. C. UCO40

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	73127	25364	98491
	não ardida	97534	479186	576720
	totais	170661	504550	675211

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	74260	26000	100260
	não ardida	96401	478550	574951
	totais	170661	504550	675211

TIN

Topo to raster

Conjunto de tabelas 2 - Matrizes de erro das simulações do cado de estudo 2003.

M. C. Anderson

		Real		
		ardida	não ardida	totais
Simulada	ardida	26399	1350	27749
	não ardida	69051	159840	228891
	totais	95450	161190	256640

		Real		
		ardida	não ardida	totais
Simulada	ardida	24634	1337	25971
	não ardida	70816	159853	230669
	totais	95450	161190	256640

M. C. Scott & Burgan

		Real		
		ardida	não ardida	totais
Simulada	ardida	47976	2092	50068
	não ardida	47474	159098	206572
	totais	95450	161190	256640

		Real		
		ardida	não ardida	totais
Simulada	ardida	48710	1916	50626
	não ardida	46740	159274	206014
	totais	95450	161190	256640

M. C. Fernandes

		Real		
		ardida	não ardida	totais
Simulada	ardida	76282	4808	81090
	não ardida	19168	156382	175550
	totais	95450	161190	256640

		Real		
		ardida	não ardida	totais
Simulada	ardida	75082	4737	79819
	não ardida	20368	156453	176821
	totais	95450	161190	256640

M. C. UCO40

		Real		
		ardida	não ardida	totais
Simulada	ardida	50784	2099	52883
	não ardida	44666	159091	203757
	totais	95450	161190	256640

		Real		
		ardida	não ardida	totais
Simulada	ardida	47695	2053	49748
	não ardida	47755	159137	206892
	totais	95450	161190	256640

TIN

Topo to raster

Conjunto de tabelas 3 - Matrizes de erro das simulações do cado de estudo 2004.

M. C. Anderson

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	6862	2898	9760
	não ardida	2517	28939	31456
	totais	9379	31837	41216

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	6452	2914	9366
	não ardida	2927	28923	31850
	totais	9379	31837	41216

M. C. Scott & Burgan

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	6593	3882	10475
	não ardida	2786	27955	30741
	totais	9379	31837	41216

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	7727	4684	12411
	não ardida	1652	27153	28805
	totais	9379	31837	41216

M. C. Fernandes

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	8372	6432	14804
	não ardida	1007	25405	26412
	totais	9379	31837	41216

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	6772	7643	14415
	não ardida	2607	24194	26801
	totais	9379	31837	41216

M. C. UCO40

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	5137	3194	8331
	não ardida	4242	28643	32885
	totais	9379	31837	41216

Simulada	Real			
		ardida	não ardida	totais
	ardida	5754	3819	9573
	não ardida	3625	28018	31643
	totais	9379	31837	41216

TIN

Topo to raster

Conjunto de tabelas 4 - Matrizes de erro das simulações do cado de estudo 2005.

C& SIG